



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
VICERRECTORÍA INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO
DIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
MAESTRÍA INGENIERÍA ESTRUCTURAL Y SÍSMICA

*Tesis para la obtención del grado de
Máster en
Ingeniería Estructural y Sísmica*

TÍTULO DE LA TESIS:

**“ANÁLISIS COMPARATIVO DE COMPORTAMIENTO Y
COSTOS DE UNA ESTRUCTURA CONVENCIONAL Y UNA
ESTRUCTURA CON AISLAMIENTO DE BASE”**

Autor de tesis: ING. BENJI PAUL DE JESÚS PÉREZ LAYME

Tutor de tesis: ING. LEONARDO CANO S. MSC. PHD

Managua Nicaragua Noviembre, 2019

Índice General

Índice De Tablas	v
Índice De Gráficos	vi
Resumen De La Tesis.....	viii
1. Introducción	1
2. Antecedentes	2
3. Planteamiento De La Situación	3
3.1. Hipótesis	5
4. Objetivos.....	5
4.1. Objetivo General	5
4.2. Objetivos Específicos.....	5
5. Justificación	5
6. Marco Teórico.....	6
6.1. Fundamentos Del Sistemas De Aislación Basal.....	6
6.1.1. Introducción	6
6.1.2. Aisladores Sísmicos.....	7
6.1.3. Tipos De Aisladores Sísmicos.....	13
6.1.3.1. Aisladores Elastoméricos	14
6.1.3.1.1. Aislador Elastomérico De Bajo Amortiguamiento (LRD)	14
6.1.3.1.2. Aislador Elastomérico De Alto Amortiguamiento (HDR)	15
6.1.3.1.3. Aislador Elastomérico Con Núcleo De Plomo.....	17
6.1.3.2. Aisladores De Fricción O Deslizadores Friccionales	19
6.1.3.2.1. Péndulo de fricción simple (PFS)	19
6.1.4. Modelos De Los Sistemas De Aislación.....	19
6.1.4.1. Modelo Bilineal Para Aisladores Elastoméricos.....	19

6.1.4.2. Modelo Bilineal Para Aisladores Péndulo de Fricción Simple PFS	21
6.2. Análisis Estructural De Edificaciones Aisladas Según El Proyecto De Norma Técnica De Aislamiento Sísmico E.031	26
6.2.1. Procedimiento De Fuerzas Estáticas Equivalentes	26
6.2.1.1. Desplazamientos Laterales Considerados Para El Diseño	26
6.2.1.1.1. Desplazamiento Traslacional	26
6.2.1.1.2. Período Efectivo Correspondiente Al Desplazamiento Traslacional ...	27
6.2.1.1.3. Desplazamiento Total	28
6.2.1.2. Fuerzas Laterales Mínimas Consideras Para El Diseño.....	29
6.2.1.2.1. Sistema De Aislamiento Y Elementos Estructurales Bajo El Nivel De Base	29
6.2.1.2.2. Elementos Estructurales Sobre El Nivel De Base.....	30
6.2.1.2.3. Límites De VS	32
6.2.1.2.4. Distribución Vertical De La Fuerza	33
6.2.1.2.5. Límites De La Deriva.....	34
6.2.2. Procedimiento De Análisis Dinámicos	35
6.2.2.1. Descripción De Procedimientos	35
6.2.2.2. Solicitación Sísmica	35
6.2.2.3. Procedimiento Modal Espectral.....	35
6.2.3. Análisis Tiempo-Historia	36
6.2.3.1. Excentricidad Accidental De La Masa	36
6.2.3.2. Fuerzas Y Desplazamientos Laterales Mínimos.....	37
6.2.3.2.1. Sistema De Aislamiento Y Elementos Estructurales En La Subestructura.....	37
6.2.3.2.2. Elementos Estructurales Sobre El Sistema De Aislamiento	37
6.2.3.2.3. Escalamiento De Resultados	38

6.2.3.2.4. Límites De Deriva.....	38
6.3. Desempeño De Un Edificio Aislado	38
6.3.1. Niveles de sismo	39
6.3.2. Estados de daño	39
6.3.3. Daño Estructural	39
6.3.4. Daño No Estructural – Componentes Sensible A Aceleración.....	40
6.3.5. Relación De Costos De Reparación.....	40
7. Diagnóstico De La Situación Y Desarrollo.....	41
7.1. Descripción De Sitio.....	41
7.2. Efecto De Los Sismos En Las Estructuras De Base Empotrada	41
7.3. Diagnóstico De La Situación	41
7.4. Reducción Del Riesgo Sísmico	42
7.5. Diseño Metodológico	42
7.5.1. Tipo De Investigación.....	42
7.5.2. Universo, Población y Muestra.....	42
7.5.2.1.1. Universo.....	42
7.5.2.1.2. Población	42
7.5.3. Descripción De Fuentes De Información.....	42
7.5.4. Técnicas De Análisis Y Procesamiento De La Información	43
7.5.5. Procedimiento Metodológico	43
8. Aplicación De La Solución Propuesta Y Resultados Obtenidos	44
8.1. Análisis Y Diseño De La Edificación Con Base Empotrada	44
8.1.1. Resumen De Parámetros Sísmicos	44
8.1.2. Vista En Planta Y Altura De La Edificación	45
8.1.3. Análisis Por Fuerzas Horizontales Equivalentes	46

8.1.4. Análisis Dinámico Modal De Respuesta Espectral	48
8.1.4.1. Espectro De Pseudo Aceleraciones	48
8.1.4.2. Modelo Matemático De La Edificación	48
8.1.4.3. Análisis Modal.....	49
8.1.4.4. Análisis Espectral.....	50
8.1.5. Análisis Dinámico Tiempo Historia No Lineal	51
8.1.5.1. Espectro Objetivo.....	60
8.1.5.2. Escalamiento De los Registros Sísmicos	61
8.1.5.3. Desplazamientos Y Derivas	63
8.1.5.4. Aceleraciones Absolutas	65
8.1.5.5. Fuerzas Cortantes	66
8.2. Análisis Y Diseño De La Edificación De Base Aislada	67
8.2.1. Análisis Por Fuerzas Horizontales Equivalentes	67
8.3. Análisis Y Diseño De La Edificación Con Aislador Núcleo De Plomo LRB ..	70
8.3.1. Análisis Modal.....	70
8.3.2. Análisis Tiempo Historia No Lineal.....	71
8.3.2.1. Desplazamientos Y Derivas	71
8.3.2.2. Aceleraciones Absolutas	74
8.3.2.3. Fuerzas Cortantes	76
8.4. Comparación Del Comportamiento De La Edificación De Base Empotrada VS La Edificación Con Aislador De Núcleo De Plomo LRB	78
8.4.1. Modos De Vibración.....	78
8.4.2. Desplazamientos Y Derivas	79
8.4.3. Derivas.....	81
8.4.4. Aceleraciones Absolutas.....	82

8.4.5. Fuerza Cortante	84
8.5. Comparación De Costos De La Edificación De Base Empotrada VS La Edificación Con Aislador De Núcleo De Plomo LRB.....	86
9. Conclusiones	88
10. Bibliografía.....	90
11. Anexos.....	93

Índice De Tablas

Tabla 1 Derivas promedio para determinar el estado de daño en edificaciones aporticadas de 4 a 7 pisos Adaptado de (HAZUS, 2003, págs. 5-45, 5-46, 5-47, 5-48)	40
Tabla 2 Picos de Aceleración de entrepiso (g) para definir el nivel de daño ni estructural de componentes sensible a aceleraciones Adaptado de (HAZUS, 2003, págs. 5-54).....	40
Tabla 3 Índice de costos de reparación para hospitales (% de costo total del edificio) Adaptado de (HAZUS, 2003, págs. 15-11, 15-12 y 15-13)	41
Tabla 4 Peso sísmico de la edificación	47
Tabla 5 Distribución de la fuerza sísmica en altura	47
Tabla 6 Modos de vibración y masa participativa	49
Tabla 7 Derivas de entrepiso	50
Tabla 8 Verificación del cortante mínimo.....	50
Tabla 9 Desplazamientos de la edificación con base empotrada	63
Tabla 10 Derivas de la edificación con base empotrada.....	64
Tabla 11 Aceleraciones absolutas de la edificación con base empotrada	65
Tabla 12 Fuerza cortante en cada entrepiso de la edificación con base empotrada	66
Tabla 13 Resumen de parámetros bilineales del aislador LRB.....	68
Tabla 14 Modos de vibración de la estructura con aislador LRB – Límite inferior	70
Tabla 15 Modos de vibración de la estructura con aislador LRB – Nominal.....	70
Tabla 16 Modos de vibración de la estructura con aislador LRB – Límite superior	70
Tabla 17 Desplazamientos de la edificación con aislador LRB	71
Tabla 18 Derivas de la edificación con aislador LRB	73
Tabla 19 Aceleración absoluta de la edificación con aislador LRB	75
Tabla 20 Fuerza cortante de la edificación con aislador LRB	77
Tabla 21 Comparación de los modos de vibración	78
Tabla 22 Porcentaje de reducción de las derivas	82
Tabla 23 Porcentaje de reducción de la aceleración absoluta.....	83
Tabla 24 Porcentaje de reducción de la fuerza cortante	85
Tabla 25 Costo de la estructura convencional.....	86
Tabla 26 Costo de la estructura de base aislada.....	86

Índice De Gráficos

Figura 1 Sistemas de protecciones sísmicas Fuente: (Aguiar , Vergara, Guaygua, & Monge, 2014, pág. 36)	7
Figura 2 Aislador de goma natural Fuente: (Kelly & Konstantinidis, 2011, pág. 7)	8
Figura 3 Edificación sin aislamiento sísmico y edificación con aislamiento sísmico Fuente: (Genatios & Lafuente, 2016, pág. 51)	9
Figura 4 Disminución de la aceleración espectral por incorporación del aislador sísmico Fuente: adaptado de (Constantinou, Kalpakidis, Filiatrault, & Ecker Lay, 2011, pág. 3)	10
Figura 5 Aislador elastomérico de bajo amortiguamiento Fuente: (Bridgestone, 2015, pág. 2)	15
Figura 6 Aislador elastomérico de alto amortiguamiento Fuente: (Bridgestone, 2015, pág. 2)	16
Figura 7 Aislador elastomérico con núcleo de plomo Fuente: (Bridgestone, 2015, pág. 2)	18
Figura 8 Aislador péndulo de fricción simple Fuente: (Morgan & Mahin, 2011, pág. 22)	19
Figura 9 Parámetros del bucle de histéresis Fuente: (Farzad & Kelly, 1999, pág. 104)	20
Figura 10 Diagrama de cuerpo libre del aislador FPS en la configuración deformada Fuente: (Fenz & Constantino, 2008, pág. 18)	22
Figura 11 Comportamiento histerético del aislador péndulo de fricción simple Fuente: (Fenz & Constantino, 2008, pág. 20)	24
Figura 12 Factor de amortiguamiento BM (Tabla N°5 – E.031) Fuente: Ministerio De Vivienda, 2018, pág. 28.....	27
Figura 13 Vista en planta de la estructura Fuente: propia	45
Figura 14 Vista en elevación de la estructura Fuente: propia	46
Figura 15 Espectro de pseudo-aceleraciones inelástico Fuente: propia.....	48
Figura 16 Modelo matemático de la estructura convencional Fuente: propia.....	49
Figura 17 Sismo Lima 1966 E-W Fuente: propia	51
Figura 18 Sismo Lima 1966 N-S Fuente: propia	52
Figura 19 Sismo Lima 1970 E-W Fuente: propia	52
Figura 20 Sismo Lima 1970 N-S Fuente: propia	53
Figura 21 Sismo Lima 1974 E-W Fuente: propia	54
Figura 22 Sismo Lima 1974 N-S Fuente: propia	54
Figura 23 Sismo Ica 2007 E-W Fuente: propia	55
Figura 24 Sismo Ica 2007 N-S Fuente: propia	56
Figura 25 Sismo Cañete 1974 E-W Fuente: propia	56
Figura 26 Sismo Cañete 1974 N-S Fuente: propia	57
Figura 27 Sismo Huacho 1966 E-W Fuente: propia	58
Figura 28 Sismo Huacho 1966 N-S Fuente: propia	59
Figura 29 Sismo Huaraz 1970 E-W Fuente: propia	59
Figura 30 Sismo Huaraz 1970 N-S Fuente: propia	60
Figura 31 Comparación del espectro de pseudo-aceleraciones del sismo severo vs sismo máximo considerado Fuente: propia	60
Figura 32 Registro sísmico obtenido del acelerógrafo Fuente: propia	61
Figura 33 Registro sísmico corregido y filtrado Fuente: propia	62
Figura 34 Registro sísmico escalado al espectro de objetivo Fuente: propia	63
Figura 35 Desplazamiento de la edificación de base empotrada Fuente: propia	64

Figura 36 Derivas de la edificación de base empotrada Fuente: propia	65
Figura 37 Aceleración absoluta de la edificación de base empotrada Fuente: propia	66
Figura 38 Fuerza Cortante de la edificación de base empotrada Fuente: propia	67
Figura 39 Diagrama de histéresis aislador LRB Fuente: propia	69
Figura 40 Desplazamiento de la edificación con aislador LRB – Eje X Fuente: propia	72
Figura 41 Desplazamiento de la edificación con aislador LRB – Eje Y Fuente: propia	72
Figura 42 Derivas de la edificación con aislador LRB – Eje X Fuente: propia	73
Figura 43 Derivas de la edificación con aislador LRB – Eje Y Fuente: propia	74
Figura 44 Aceleración absoluta de la edificación con aislador LRB – Eje X Fuente: propia	75
Figura 45 Aceleración absoluta de la edificación con aislador LRB – Eje Y Fuente: propia	76
Figura 46 Fuerza cortante de la edificación con aislador LRB – Eje X Fuente: propia	77
Figura 47 Fuerza cortante de la edificación con aislador LRB – Eje Y Fuente: propia	78
Figura 48 Comparación de desplazamientos de la edificación de base empotrada vs la edificación con aislador LRB – Eje X Fuente: propia	79
Figura 49 Comparación de desplazamientos de la edificación de base empotrada vs la edificación con aislador LRB – Eje Y Fuente: propia	80
Figura 50 Comparación de derivas de la edificación de base empotrada vs la edificación con aislador LRB – Eje X Fuente: propia	81
Figura 51 Comparación de derivas de la edificación de base empotrada vs la edificación con aislador LRB – Eje Y Fuente: propia	81
Figura 52 Comparación de la aceleración absoluta de la edificación de base empotrada vs la edificación con aislador LRB – Eje X Fuente: propia	82
Figura 53 Comparación de la aceleración absoluta de la edificación de base empotrada vs la edificación con aislador LRB – Eje Y Fuente: propia	83
Figura 54 Comparación de la fuerza cortante de la edificación de base empotrada vs la edificación con aislador LRB – Eje X Fuente: propia	84
Figura 55 Comparación de la fuerza cortante de la edificación de base empotrada vs la edificación con aislador LRB – Eje Y Fuente: propia	85

Resumen De La Tesis

En el presente trabajo de investigación se realiza una comparación de comportamiento y costos de una edificación convencional (edificación de base empotrada) y una edificación considerando aisladores elastoméricos con núcleo de plomo.

En primer lugar, se modela la estructura convencional usando el programa Etabs y se realiza el análisis sísmico usando la Norma Técnica de Diseño Sismorresistente E.030 y seguidamente se realiza el diseño de los elementos de concreto armado usando la Norma Técnica E.060, luego se analiza el comportamiento de la estructura y se evalúa el costo de la misma.

En segundo lugar, se idealiza la estructura con base aislada, y se realiza el análisis sísmico usando el Proyecto de Norma Aislamiento de Base E.031 y el ASCE 7-16, seguidamente se realiza el diseño de los elementos de concreto armado, luego se analiza el comportamiento de la estructura y finalmente se evalúa el costo.

Finalmente se realiza una comparación del comportamiento de la estructura diseñada convencionalmente y la estructura de base aislada, además se comparan los costos de las mismas.

Concluimos diciendo que se logró el objetivo, trasladar el periodo corto a un periodo largo, esto significa que la estructura aislada estará sometida a una menor demanda sísmica en comparación con la estructura de base aislada, esto debido a la flexibilidad de los aisladores; además se aprecia que el incremento del costo de la estructura al usar aisladores de base es considerablemente mayor.

El aislamiento de base en estructuras esenciales como lo es una clínica no debe ser tomado en cuenta desde el punto de vista económico a corto plazo sino a largo plazo, además por las bondades que ofrece: reducción de derivas, reducción de aceleraciones y reducción de fuerza cortante, y por otro lado garantiza la funcionalidad continua durante y después de un terremoto.

1. Introducción

El presente trabajo se realiza en la ciudad de Lima, capital del Perú; que se encuentra situada en la costa central del país, a orillas del Océano Pacífico.

El Perú forma parte del borde occidental de América del Sur que se caracteriza por ser una de las regiones sísmicamente más activas en el mundo (Bufo & Tavera, 1998, pág. 188).

Lima está ubicada en una zona de alta sismicidad, pertenece al cinturón de fuego del pacífico y “la principal fuente que genera sismos se encuentra entre las placas de Nazca y Sudamérica debido al proceso de convergencia que se desarrolla entre ambas” (Gomez, Bernal, & Tavera, 2010, pág. 8).

Los movimientos sísmicos producen cuantiosos daños, “una de las razones importantes es el crecimiento no planificado y sin control de las ciudades ubicadas en zonas con alto peligro sísmico, generando el riesgo de sufrir grandes pérdidas humanas, materiales y económicos en caso de generarse un terremoto” (PREDES, 2009, pág. 6); además las estructuras diseñadas con cimientos antiguos son vulnerables ante un evento sísmico debido a que no cumplen con los requisitos de rigidez, resistencia y ductilidad que exigen los códigos actuales.

Una manera de minimizar los daños en las estructuras es usando sistemas de protección sísmica. En este trabajo de investigación nos enfocaremos en aisladores sísmicos. La aislación sísmica nos permite reducir el daño estructural de las edificaciones, mediante el control de distorsiones y aceleraciones en cada nivel.

En el presente trabajo de investigación estudiaremos un 01 edificio de concreto armado ubicado en la ciudad de Lima – Perú, la cual es una clínica particular – edificación esencial, realizaremos una comparación del comportamiento y costos del edificio diseñado en sistema estructural convencional y el edificio diseñado usando un sistema de aislamiento de base.

2. Antecedentes

La aislación sísmica en el Perú para estructuras con periodo fundamental corto, que son muy vulnerables a las acciones sísmicas, es beneficiosa debido a que lleva a la estructura a periodos largos, más allá del periodo predominante, logrando disminuir los daños tanto en la estructura, elementos no estructurales, en los contenidos y sus ocupantes. No obstante, la frecuencia de vibración de los suelos debe tenerse en cuenta, por lo que los suelos del tipo S3 (suelo flexible), por lo general con frecuencias bajas de amplificación, resultan indeseables para el diseño de edificios con aislamiento en la base (Palacios, 2015).

De acuerdo con las observaciones realizadas a partir del análisis de diferentes edificios aislados, se ha concluido que tanto la altura como la esbeltez de la edificación son parámetros limitantes para el aislamiento eficiente de una estructura. La esbeltez y la altura están directamente vinculadas con la capacidad de carga de los aisladores, que es el factor que controla la eficiencia del diseño en estos casos. Asimismo, el periodo natural de la superestructura es un indicador de la eficiencia posible en la aislación. Un periodo muy alto impide conseguir una diferenciación con el periodo del conjunto aislado, de forma que resulta difícil concentrar los desplazamientos en la interface de aislación (Korswagen Eguren, Arias Ricse, & Huaranga Huamaní, 2012, pág. 90).

Se sabe de otros estudios que una combinación de aisladores elastoméricos y friccionales y/o deslizadores ayudan a mejorar el comportamiento de la estructura, “esto resulta muy beneficioso ya que el costo de los deslizadores está por debajo del 50%, en muchos casos, del costo de los aisladores elastoméricos” (Molero, 2015, pág. 97).

Dada la falta de registros sísmicos peruanos y a qué solo se cuenta con señales de moderada o baja intensidad en su mayoría, es necesario recurrir a señales sintéticas (Molero, 2015, pág. 96).

Es conveniente utilizar vigas de mayor peralte en el diafragma de aislación debido a los mayores esfuerzos que actuarán sobre estas durante su vida útil. También vigas de arriostre en la parrilla inferior, esto para prevenir que ocurran desplazamientos en las columnas que puedan dificultar el funcionamiento de los aisladores. Para evitar cualquier desplazamiento diferencial en la cimentación que pueda afectar el funcionamiento del sistema aislado es recomendable conectar todas las zapatas con vigas de cimentación (Alex Deybi, 2018, pág. 108).

Se debe tener cuidado en los detalles de los anclajes entre el aislamiento, la superestructura y la cimentación. Además, los elementos y conexiones flexibles deben estar diseñados para desarrollar desplazamientos según el máximo sismo esperado. Si esto no ocurriese, podría ocasionar el colapso de la estructura (Carmona Ramírez & Rosas Fetta, 2015, pág. 111).

El Perú no tiene norma sísmica de aislamiento basal, por tal motivo se tienen que usar códigos de difusión y aceptación internacional que no pueden aplicarse directamente en el país ya que es necesario tomar en cuenta las condiciones sísmicas y la práctica de ingeniería locales. Actualmente ya cuenta con un PROYECTO DE NORMA TÉCNICA DE AISLAMIENTO SÍSMICO E-031 que está en proceso de evaluación para su aprobación.

3. Planteamiento De La Situación

La ciudad de Lima se encuentra ubicada en una zona de alta sismicidad y está en silencio sísmico a la espera de un sismo de gran intensidad, estos sismos de gran intensidad producen daños devastadores, causando grandes pérdidas humanas, materiales y económicos, una manera de minimizar estos daños es usando sistemas de protección sísmica.

En la actualidad el crecimiento poblacional no planificado y sin control, las construcciones informales, la falta de supervisión de los proyectos y construcciones de edificios por parte de las Municipalidades y entidades correspondientes nos

hacen vulnerables con alto riesgo de pérdidas humanas, materiales, y económicos ante un evento sísmico.

Las estructuras diseñadas con normas sísmicas antiguas no cumplen con los requisitos de rigidez, resistencia y ductilidad que exigen las normas vigentes, por ende, es necesario el estudio de nuevas tecnologías que ayuden a mejorar la respuesta de las estructuras ante eventos sísmicos.

Las técnicas convencionales estipuladas por la reglamentación actual para mitigar y controlar la respuesta de una edificación ante un evento sísmico se basan en la combinación de resistencia, rigidez y capacidad de disipación de energía en el rango inelástico de la estructura, tomando como condición su ductilidad. En estructuras de hormigón armado y otros materiales convencionales, estos métodos exigen una cuidadosa disposición del refuerzo, de la configuración estructural, de los tipos de conexiones y otros, que aumentan su costo frente a una estructura no Sismorresistente, presentando, además, el inconveniente de que la estructura, por su mismo trabajo inelástico, sufre daños permanentes, muchas veces sin posibilidad de reparación (Andrés Oviedo & Duque, 2006, pág. 106).

Desde muchos años atrás, se han desarrollado diversos estudios de sistemas que protegen a las estructuras tales como disipadores de energía y aisladores sísmicos que minimizan los daños. Los sistemas de aislación y disipación sísmica, son sistemas presentes entre la subestructura y la superestructura de edificios, puentes y también en algunos casos, en la misma superestructura de edificios, que permiten mejorar la respuesta sísmica de ellos, aumentando los periodos y proporcionando amortiguamiento y absorción de energía adicional, reduciendo sus deformaciones relativas según sea el caso.

El aislamiento sísmico es una tecnología que protege las estructuras contra los efectos destructivos de un terremoto, separando la estructura del suelo y proporcionándole amortiguamiento. Esta separación permite que el edificio se comporte con mayor flexibilidad, lo cual mejora su respuesta ante un terremoto. El amortiguamiento añadido permite que la energía del terremoto sea absorbida por el

sistema de aislamiento, reduciendo la energía transferida a la estructura (DIS, 2019, pág. 2).

3.1. Hipótesis

El comportamiento de las estructuras considerando aisladores de base es mejor que el comportamiento de las edificaciones convencionales, y el costo de las estructuras con aisladores de base es beneficioso a largo plazo.

4. Objetivos

4.1. Objetivo General

Análisis comparativo del comportamiento y costos de una estructura convencional versus una estructura con aislamiento de base.

4.2. Objetivos Específicos

Realizar el análisis sísmico y diseño estructural de la estructura convencional.

Analizar el comportamiento de la edificación convencional.

Analizar el comportamiento de los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo.

Realizar el análisis sísmico de la estructura aislada mediante el método tiempo historia no lineal y realizar el diseño estructural.

Analizar el comportamiento de la edificación considerando aisladores elastoméricos con núcleo de plomo.

Comparar el comportamiento y costos de la edificación convencional y la edificación con aislador elastomérico con núcleo de plomo.

5. Justificación

Lima es parte del cinturón de fuego del pacífico y se encuentra en silencio sísmico a la espera de un sismo de gran intensidad y los efectos de estos son devastadores,

por ello eso se busca mejorar el comportamiento de las estructuras ante los terremotos usando sistemas de protección sísmica como el aislador sísmico para minimizar sus efectos.

Es importante realizar la presente investigación porque tendremos información de cómo se comporta una estructura convencional y una estructura con aislador sísmico elastomérico con núcleo de plomo, y se tendrá una información sobre la variación de costos, estos resultados le servirán como guía de diseño a los ingenieros que se dediquen al diseño estructural.

Esta investigación ayudara a incentivar el uso de nuevas tecnologías para la reducción del riesgo sísmico en el Perú.

6. Marco Teórico

6.1. Fundamentos Del Sistemas De Aislación Basal

6.1.1. Introducción

Todo evento sísmico deja a su paso pérdidas humanas y materiales, por tal razón la humanidad ha desarrollado en los últimos años sistemas de protección que ayudan a mitigar los efectos destructivos de una estructura durante un sismo, como son los sistemas de disipación pasiva, sistemas de disipación activa, sistemas híbridos y sistemas semi-activos, **ver figura 1** (Aguiar , Vergara, Guaygua, & Monge, 2014, pág. 36).

Hoy en día los sistemas más utilizados para mitigar los efectos de un sismo es el aislamiento sísmico (elemento de disipación pasiva); el aislamiento sísmico es una estrategia de diseño basada en la premisa de que es posible separar una estructura de los movimientos del suelo mediante la introducción de elementos flexibles entre la estructura y su fundación. Los aisladores reducen notablemente la rigidez del sistema estructural, haciendo que el periodo fundamental de la estructura aislada sea mucho mayor que el de la misma estructura con base fija (Aguiar , Vergara, Guaygua, & Monge, 2014, pág. 36).

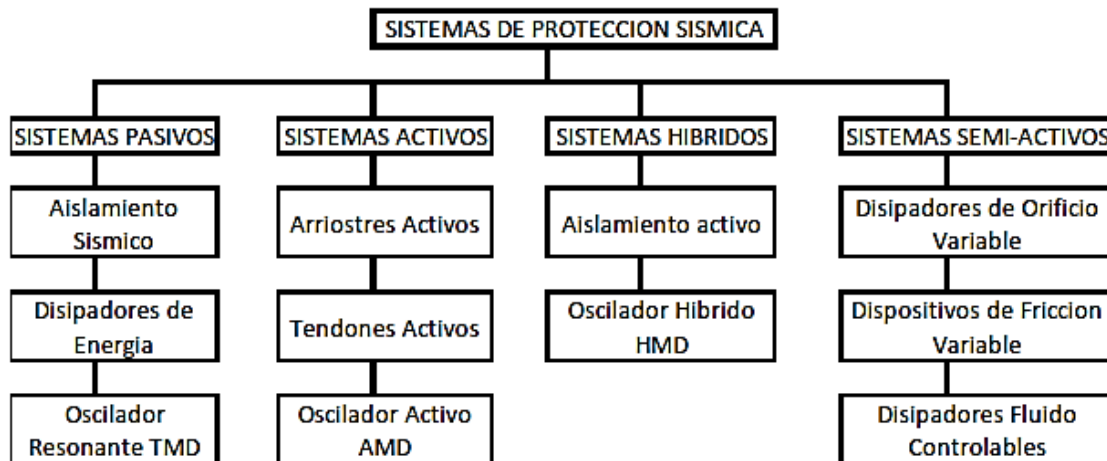


Figura 1 Sistemas de protecciones sísmicas
Fuente: (Aguiar , Vergara, Guaygua, & Monge, 2014, pág. 36)

Por ésta razón, los edificios con aislamiento sísmico tienen un mejor comportamiento que los edificios que no cuentan con dispositivos aisladores de base, cumpliendo el objetivo fundamental de la aislación sísmica que es el de mantener la respuesta dentro de los límites de seguridad, servicio y confort humano (Aguiar , Vergara, Guaygua, & Monge, 2014, pág. 36).

6.1.2. Aisladores Sísmicos

Un aislador sísmico es un elemento muy flexible que se coloca entre la estructura y la fundación, a fin de transmitir la menor cantidad de movimiento a la estructura, en el momento de ocurrencia de un terremoto (Figura 2). De no existir el aislador, la fundación transmitiría gran cantidad de vibraciones a la estructura; al colocar el aislador, disminuyen las vibraciones en la estructura. La estructura sin aislador será denominada, de ahora en adelante, estructura de base fija (ver Figura 3) (Genatios & Lafuente, 2016, pág. 49).

Los aisladores se incorporan al sistema estructural y cambian sus propiedades dinámicas. Por ser muy flexibles, contribuyen a incrementar el periodo fundamental de vibración del sistema estructural. En el espectro de frecuencias del sismo, a estos altos períodos de vibración, corresponden valores bajos de aceleraciones, por lo que las fuerzas inducidas por el sismo sobre la estructura disminuyen

significativamente. Por otro lado, las deformaciones se incrementan de manera importante, pero estas deformaciones se concentran en los aisladores sísmicos, lo que hace que la estructura primaria sufra sólo pequeñas deformaciones. Los aisladores también producen un efecto de amortiguamiento importante que contribuye a disipar la energía introducida por el sismo (Genatios & Lafuente, 2016, pág. 50).



Figura 2 Aislador de goma natural
Fuente: (Kelly & Konstantinidis, 2011, pág. 7)

Los aisladores sísmicos son concebidos e instalados para que los movimientos horizontales de la fundación, generados por el sismo, no sean transmitidos a la estructura. Los aisladores no son diseñados, en general, para aislar movimientos verticales, y esto es debido a dos causas: la primera es que las vibraciones verticales producidas por los sismos son generalmente menores que las horizontales; la segunda razón es que las estructuras, dado que deben resistir las cargas gravitacionales, son diseñadas con gran rigidez y resistencia a cargas verticales (Genatios & Lafuente, 2016, pág. 50).

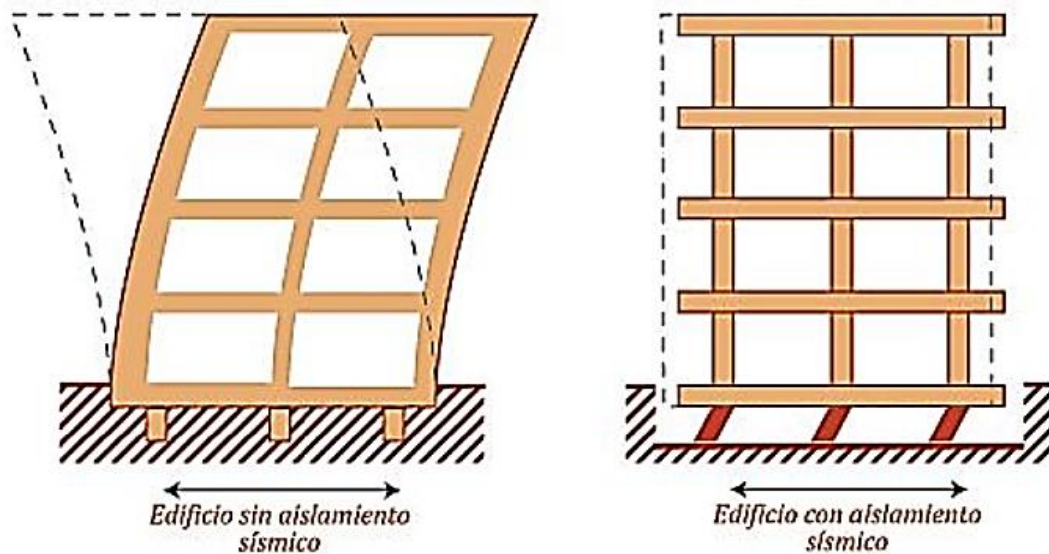


Figura 3 Edificación sin aislamiento sísmico y edificación con aislamiento sísmico
Fuente: (Genatios & Lafuente, 2016, pág. 51)

La presencia de los aisladores sísmicos no sólo reduce los desplazamientos horizontales de la estructura, sino que concentra los desplazamientos y las eventuales deformaciones para los sismos mayores, en la zona de interfaz de la fundación y la estructura, que corresponde al aislador. Esto permite también hacer reparaciones de manera más sencilla y económica, ya que los eventuales daños se concentran en esas zonas (Genatios & Lafuente, 2016, pág. 50).

Dado que un sistema de aislamiento sísmico incrementa el nivel de protección de la estructura, resulta adecuado para su uso en estructuras que deben mantenerse operativas durante un terremoto, tales como hospitales, estaciones de bomberos, centros de atención de emergencias, estructuras de comunicación principales, centrales energéticas, estaciones de policías, centros de información estratégicos, etc. También son adecuados para la protección de estructuras patrimoniales y monumentos históricos (Genatios & Lafuente, 2016, pág. 51).

La Figura 4 muestra de manera esquemática, la variación en la acción espectral en estructuras de base fija y con aislamiento. El periodo de vibración de la estructura sin aislamiento es mostrado como T_1 . Al incluir el aislador a la estructura, el primer periodo de vibración del sistema se incrementa a T_2 , lo que supone una carga

sísmica inferior (medida en términos del corte basal). Adicionalmente, los espectros de fuerzas se reducen por el efecto del amortiguamiento introducido por el aislador (Genatios & Lafuente, 2016, pág. 51).

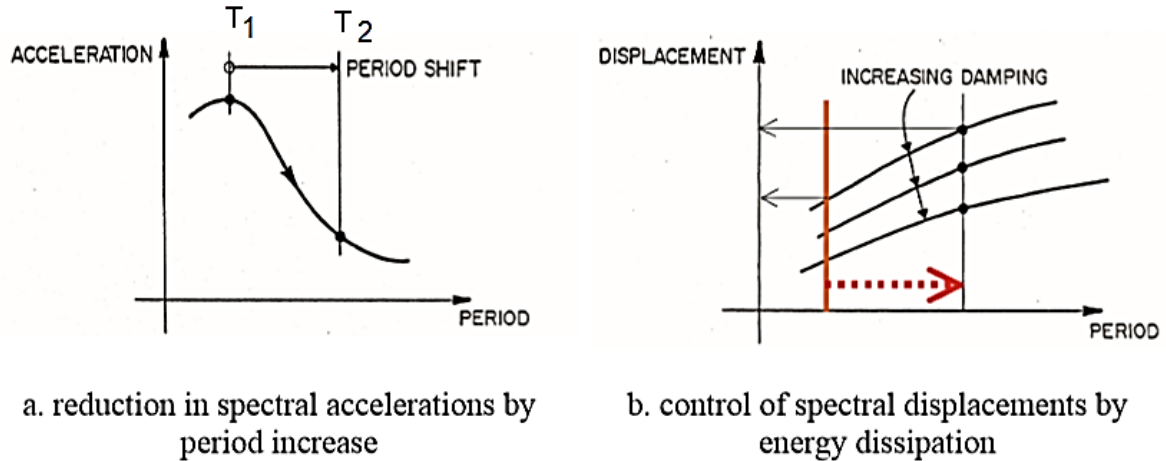


Figura 4 Disminución de la aceleración espectral por incorporación del aislador sísmico
Fuente: adaptado de (Constantinou, Kalpakidis, Filiatrault, & Ecker Lay, 2011, pág. 3)

Como ya se ha establecido, la presencia de aisladores sísmicos reduce la sollicitación sísmica a la que es sometida el sistema estructural. Adicionalmente, se concentran los desplazamientos y sollicitaciones en el propio sistema de aislamiento, por lo que la estructura no es sometida a regímenes de fuertes deformaciones (que podrían generar fallas por grandes esfuerzos) ni a regímenes de grandes desplazamientos (que podrían generar el colapso de la estructura por inestabilidad y efectos de segundo orden). Como el daño se concentra en los aisladores, la reparación puede ser, en general, más sencilla y económica (Genatios & Lafuente, 2016, pág. 52).

Como ya ha sido señalado, los diseños sísmicos de estructuras se orientan hacia el cumplimiento de ciertos objetivos de desempeño frente a distintos niveles de sismos. Se establecen usualmente hasta tres objetivos de desempeño: a) que las estructuras no colapsen a fin de preservar las vidas humanas, en el caso de terremotos severos de ocurrencia excepcional; b) que las estructuras sufran daños reparables (tanto en elementos estructurales como no estructurales) con la ocurrencia de sismos moderados probables; y c) que la estructura no sufra daños

(ni estructurales ni no estructurales) ante sismos frecuentes de baja intensidad. Sin embargo, según el procedimiento tradicional de diseño sísmico de edificaciones, sólo se verifica la primera condición, y usualmente se diseña para sismos con probabilidad de excedencia del 10% en el tiempo de vida útil de la estructura, la cual se establece de 50 años en la mayoría de los casos (las normas prevén también el diseño con menores probabilidades de excedencia para estructuras importantes). En los últimos tiempos se ha asumido en las estrategias del diseño ingenieril, la necesidad de aumentar la resiliencia de las ciudades, por lo que ciertas edificaciones y obras de infraestructura deben ser diseñadas para cumplir con los niveles de desempeño b y c. Algunas normas técnicas de diseño sísmico ya han incorporado al menos dos niveles de verificación (Genatios & Lafuente, 2016, págs. 52,53).

Las estructuras sin aisladores sísmicos están diseñadas, por lo general, para presentar una respuesta ante sismos severos, caracterizada por mecanismos de disipación de energía producidos por desplazamientos importantes entre los pisos (derivas), los cuales conducen a incursiones en el rango inelástico de algunos de los elementos estructurales. Esto genera deterioro de elementos estructurales como vigas, columnas y muros. Los procesos de incursión en el rango inelástico imponen deformaciones remanentes, desprendimiento de recubrimiento, desarrollo de tensiones en barras de acero de confinamiento, sollicitaciones severas de flexión y de corte sobre los elementos estructurales. Los importantes desplazamientos entre pisos también producen daño en elementos no estructurales, lo cual puede incluir ventanales, paredes, recubrimientos, techos, luminarias, daños en instalaciones sanitarias, de gas, eléctricas y de telecomunicaciones, además de los daños en equipos y mobiliarios. La reparación de los daños es costosa y en muchas ocasiones impone la reconstrucción parcial o total de las estructuras dañadas por terremotos severos (Genatios & Lafuente, 2016, págs. 53,54).

Al introducir aisladores sísmicos en el diseño estructural se procura que la estructura se comporte como un cuerpo rígido, colocado sobre los aisladores; de esta manera se reducen al mínimo las deformaciones de la estructura y se

concentran en el aislador sísmico; esto permite que las derivas o desplazamientos relativos entre pisos, sean mínimos. Al lograr este efecto, las fuerzas son transmitidas al aislador, el cual responde generando grandes deformaciones. Los aisladores son específicamente diseñados para resistir estas grandes deformaciones, con lo que protegen la estructura. Al soportar estas deformaciones, los aisladores deben responder sin sufrir daños, y en el caso en que éstos se produzcan, quedan concentrados en el sistema de aisladores, limitando significativa o totalmente, las reparaciones en la estructura primaria. Si los aisladores resultan dañados después de un sismo, es sencillo reemplazarlos, por lo que las instalaciones pueden estar nuevamente operativas rápidamente después de un sismo (Genatios & Lafuente, 2016, pág. 54).

A pesar de las importantes ventajas de los aisladores sísmicos, es necesario tener en cuenta los efectos secundarios que pueden generar problemas distintos a los que se presentan en las estructuras de base fija (Genatios & Lafuente, 2016, pág. 54).

Entre ellos, es necesario verificar los siguientes: los efectos torsionales de la estructura sobre los aisladores (lo cual puede imposibilitar el uso de aisladores), las variaciones de las vibraciones en las adyacencias de la estructura (interacciones suelo-estructura), los cuales pueden eventualmente incluir fenómenos asociados a la cercanía de una falla y movimientos de periodos largos que interactúen con depósitos profundos del suelo; los efectos del envejecimiento del aislador; los efectos de la temperatura; la posible tracción sobre los aisladores por efectos de momentos de volcamiento en la estructura, los requerimientos especiales de uniones flexibles de tuberías y otros sistemas (incluyendo escaleras en la interfaz (Genatios & Lafuente, 2016, pág. 54)).

La presencia de desplazamientos verticales, cuando se utilizan aisladores tipo péndulo, puede ser un problema, sobre todo si generan desplazamientos verticales diferentes en los distintos aisladores, lo cual produciría estados de esfuerzos que deben ser verificados sobre la estructura (Genatios & Lafuente, 2016, pág. 54).

También es necesario verificar, para estructuras muy rígidas, la posibilidad de generar, en lugar de la reducción deseada de las solicitaciones sísmicas, un incremento de cargas por la presencia de los aisladores. En efecto, si la estructura es de periodo muy corto y su acción espectral está en la rama ascendente del espectro, la presencia del aislador puede generar incremento de cargas (Genatios & Lafuente, 2016, págs. 54,55).

A manera de síntesis, puede decirse que los aisladores sísmicos funcionan porque introducen flexibilidad en la base de la estructura. En términos de dinámica de estructuras, esta componente de flexibilidad genera efectos positivos para la estructura, reduce las fuerzas horizontales asociadas a los sismos e introduce amortiguamiento adicional a la estructura. El incremento del periodo fundamental va acompañado de una modificación del modo fundamental de vibración de forma tal que se convierte en un modo de traslación. A estas variaciones en la estructura, va asociada una significativa reducción de las contribuciones de los modos superiores ya que se concentra la masa de la estructura en el modo fundamental, con lo que se reduce drásticamente la energía de excitación en los modos superiores (Genatios & Lafuente, 2016, pág. 55).

6.1.3. Tipos De Aisladores Sísmicos

Existen diversos tipos de aisladores sísmicos, cada uno con características propias en cuanto a sus mecanismos de acción, materiales, costos de implementación, estudios teóricos y tipos de estructuras en donde es más conveniente su uso. Entre los aisladores sísmicos más desarrollados se encuentran los aisladores elastoméricos, los aisladores deslizantes y los aisladores basados en resortes helicoidales y amortiguadores viscosos (Mendo Rodríguez , 2015, pág. 17).

En la presente tesis se describe algunos aisladores, pero solo se usarán en el análisis los aisladores elastoméricos con núcleo de plomo.

6.1.3.1. *Aisladores Elastoméricos*

Estos dispositivos están conformados por un conjunto de láminas planas de elastómeros intercaladas con capas de acero vulcanizadas entre sí. Las láminas de elastómeros proporcionan la flexibilidad lateral necesaria para permitir el desplazamiento horizontal relativo entre la estructura y el suelo, mientras que las láminas de acero proporcionan la rigidez vertical del sistema del sistema de aislación, estos aisladores dependen de la amplitud de la deformación a la que son sometidos, y en menor grado a la temperatura, el envejecimiento y la frecuencia del movimiento (Mendo Rodríguez , 2015, pág. 17). Entre estos dispositivos tenemos:

6.1.3.1.1. *Aislador Elastomérico De Bajo Amortiguamiento (LRD)*

Este tipo de dispositivos son los más simples dentro de los aisladores elastoméricos y consisten en un conjunto intercalado de capas de acero y caucho, el cual es vulcanizado para lograr la adherencia entre ambos materiales. Al intercalar el caucho con el acero se aumenta su capacidad para resistir cargas de gravedad y su estabilidad para soportar cargas laterales. En estos dispositivos, también se colocan placas de acero en la zona superior e inferior que sirven para confinar el núcleo y evitar la compresión del caucho ante cargas de gravedad (Mendo Rodríguez , 2015, pág. 18).

a) Características:

- * Pueden ser de goma natural o sintética.
- * Su comportamiento es lineal-elástico a bajas deformaciones y lineal-viscoso a altas deformaciones.
- * Tienen una razón de amortiguamiento crítico menor a 7% para valores de deformaciones angulares menores a 200%.

b) Ventajas:

- * Son simples de fabricar.

- * Son fáciles de modelar (modelo lineal).
- * No tienen una respuesta muy sensible a las variaciones de carga en el tiempo, la temperatura o el envejecimiento.

c) Desventajas:

- * Necesitan sistemas de amortiguamiento suplementario.

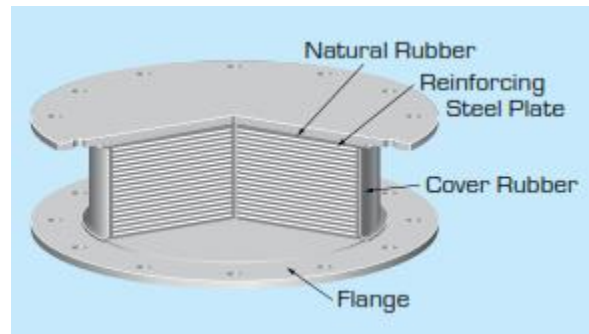


Figura 5 Aislador elastomérico de bajo amortiguamiento
Fuente: (Bridgestone, 2015, pág. 2)

6.1.3.1.2. Aislador Elastomérico De Alto Amortiguamiento (HDR)

Una característica importante de estos aisladores es que sus propiedades dinámicas son sensibles al cambio de frecuencia y temperatura que generan reducción de rigidez y amortiguamiento. Por ejemplo, cuando los dispositivos están sujetos a ciclos de movimiento, presentan mayor rigidez para los primeros ciclos de carga, que generalmente se estabilizan luego del tercer ciclo de carga. Por lo tanto, su comportamiento inicial puede ser apreciablemente diferente bajo distintos ciclos de carga y deformación, siendo sus propiedades iniciales recuperables en el tiempo (horas o días) (Mendo Rodríguez , 2015, pág. 18).

a) Características:

- * Alcanzan grandes deformaciones de corte (γ) de 2 a 3.5.
- * Incrementar el amortiguamiento por incorporación de carbón negro extrafino, aceites o resinas.

- * Su razón de amortiguamiento crítico es de 10 a 20% para una deformación de corte igual a 100%.
- * Su módulo de elasticidad de corte varía de 17 a 64 Kg/cm².
- * El amortiguamiento efectivo depende de los elastómeros, de la presión de contacto, la velocidad de carga y de los incrementos de temperatura ambiente.

b) Ventajas:

- * Combinan la flexibilidad y disipación de energía en un solo elemento
- * Su fabricación es relativamente sencillo

c) Desventajas:

- * A elevadas temperaturas su rigidez horizontal y su amortiguamiento decrecen.
- * Con el incremento de la carga axial su rigidez horizontal tiende a disminuir.
- * Las propiedades mecánicas del caucho natural se pueden degradar con la exposición prolongada al oxígeno y al ozono.

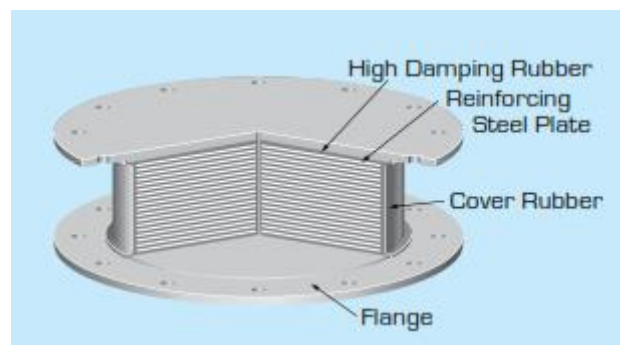


Figura 6 Aislador elastomérico de alto amortiguamiento
Fuente: (Bridgestone, 2015, pág. 2)

6.1.3.1.3. *Aislador Elastomérico Con Núcleo De Plomo*

Estos aisladores son similares a los LDR, pero incluyen un núcleo de plomo ubicado en el centro del aislador, que permite aumentar su rigidez inicial (proporciona restricción a la carga del viento) y aumenta la capacidad de disipación de energía mediante el incremento del nivel de amortiguamiento del sistema entre 25 y 30%. Al deformarse lateralmente el aislador durante la acción de un sismo, el núcleo de plomo fluye incurriendo en deformaciones plásticas, y disipando energía en forma de calor. Al término de la acción sísmica, la goma del aislador retorna la estructura a su posición original, mientras que el núcleo de plomo se recristaliza quedando en condiciones similar al original para soportar un nuevo evento sísmico (Mendo Rodríguez , 2015, pág. 19).

a) Características:

- * Su módulo de elasticidad de corte varía de 5 a 7 Kg/cm² para una deformación de corte del 100%.
- * Las variaciones de sus propiedades no son significativas como ocurre con los aisladores tipo HDR, debido a que la máxima deformación de corte no es mayor a 200% (varía de 125% a 200%).
- * La respuesta histerética es fuertemente dependiente del desplazamiento lateral.
- * Tienen una alta rigidez inicial, debido a que el esfuerzo de fluencia del plomo alcanza valores que varían alrededor de 105 Kg/cm².
- * El esfuerzo de fluencia se reduce con ciclos repetidos debido al aumento de temperatura.
- * Típicamente el núcleo de plomo abarca del 15 al 33% del diámetro total del aislador.

b) Ventajas:

- * El plomo es un material que tiene alta rigidez horizontal antes de alcanzar su fluencia y presenta un comportamiento perfectamente plástico después de su fluencia.
- * El plomo es un material en el cual se producen los procesos de recuperación y re cristalización ocurren simultáneamente a temperatura ambiente, por lo que puede recuperar sus propiedades mecánicas después de una acción inelástica.
- * Las propiedades mecánicas del núcleo de plomo no presentan cambios significativos durante el periodo de vida útil de las estructuras (50años).

c) Desventajas:

- * Los incrementos de temperatura ambientales pueden afectar su rigidez horizontal.
- * Con el incremento de la carga axial su rigidez horizontal tiende a disminuir.
- * Las propiedades del aislador LRB dependen de la historia de carga. Con el incremento de ciclos la rigidez del núcleo de plomo y el amortiguamiento decrecen.

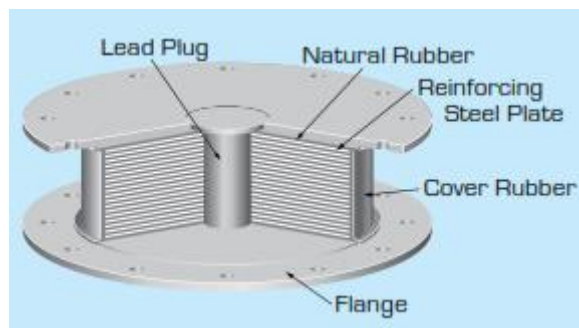


Figura 7 Aislador elastomérico con núcleo de plomo
Fuente: (Bridgestone, 2015, pág. 2)

6.1.3.2. Aisladores De Fricción O Deslizadores Friccionales

6.1.3.2.1. Péndulo de fricción simple (PFS)

El péndulo de fricción simple cóncavo es el sistema de péndulo de fricción original descrito por Zayas et al. [1987] y representa el primer deslizador fabricado para hacer uso del concepto de péndulo. Este consiste de un deslizador articulado que descansa sobre una superficie esférica cóncava. El deslizador está recubierto con un forro compuesto de PTFE (politetrafluoroetileno), y la superficie esférica está cubierta por acero inoxidable pulido. En la Figura 8 se muestra una imagen que muestra un deslizador PFS y una sección transversal, que indica los componentes descritos anteriormente (Morgan & Mahin, 2011, pág. 21).

La forma curva del aislador produce una fuerza restauradora que sirve para centrar al deslizador en su posición de inicio. Las propiedades de rigidez y amortiguamiento están determinadas por el radio de curvatura (R) y el coeficiente de fricción (μ).

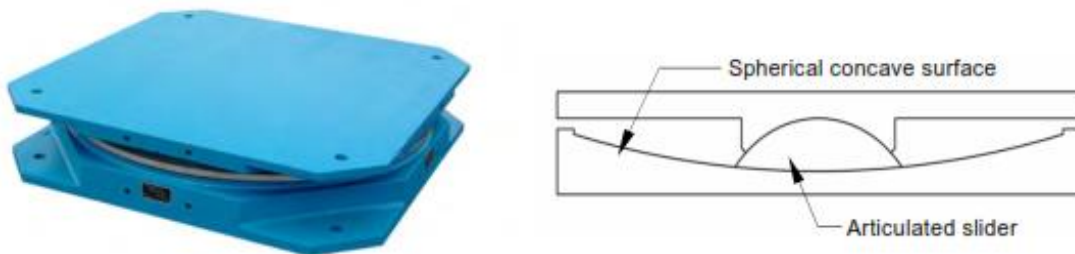


Figura 8 Aislador péndulo de fricción simple
Fuente: (Morgan & Mahin, 2011, pág. 22)

6.1.4. Modelos De Los Sistemas De Aislación

6.1.4.1. Modelo Bilineal Para Aisladores Elastoméricos

En la práctica, los aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento se modelan mediante un modelo bilineal basado en tres parámetros K_1 , K_2 y Q , como se muestra en la figura 9, la rigidez elástica K_1 se estima a partir de los bucles de histéresis

disponibles de las pruebas de los aisladores elastoméricos, la resistencia característica Q se estima a partir de los bucles de histéresis para los aisladores elastoméricos (Farzad & Kelly, 1999, pág. 104).

La ecuación para calcular la rigidez postfluencia K_2 para este tipo de aisladores es:

$$K_2 = \frac{G \cdot A_B}{t} \quad (1)$$

Donde:

A_B : el área de caucho.

t = espesor total del caucho.

G : módulo de corte del caucho.

La rigidez efectiva, definida como la pendiente secante de los valores pico a pico en un bucle de histéresis, viene dada por:

$$K_{eff} = K_2 + \frac{Q}{D}, \quad D \geq D_y \quad (2)$$

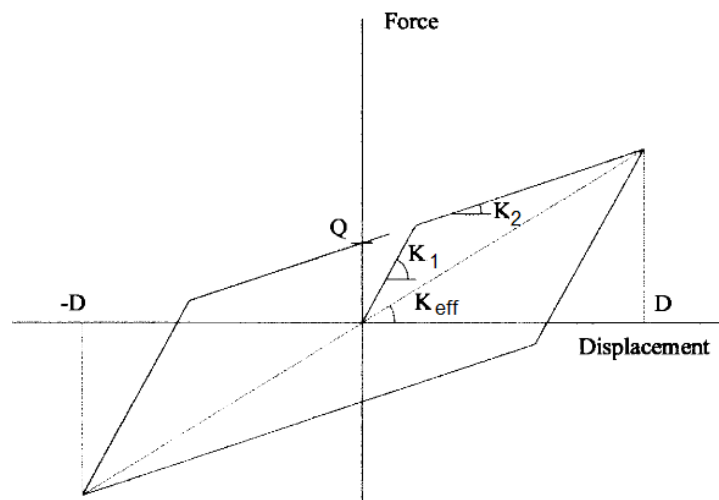


Figura 9 Parámetros del bucle de histéresis
Fuente: (Farzad & Kelly, 1999, pág. 104)

Donde D_y es el desplazamiento de fluencia, en términos de los parámetros primarios:

$$D_y = \frac{Q}{K_1 - K_2} \quad (3)$$

Y el área del bucle de histéresis (energía disipada por ciclo) es:

$$W_D = 4 \cdot Q \cdot (D - D_y) \quad (4)$$

El amortiguamiento efectivo este definido por:

$$\beta_{eff} = \frac{4 \cdot Q \cdot (D - D_y)}{2 \cdot \pi \cdot K_{eff} \cdot D^2} \quad (5)$$

La fuerza característica es:

$$Q = \frac{\pi \cdot \beta_{eff} \cdot K_{eff} \cdot D^2}{2 \cdot (D - D_y)} \quad (6)$$

La fuerza de fluencia F_y del aislador se determina fácilmente a través de la siguiente ecuación:

$$F_y = Q + K_2 \cdot D_y \quad (7)$$

6.1.4.2. Modelo Bilineal Para Aisladores Péndulo de Fricción Simple PFS

El comportamiento del aislador péndulo de fricción simple fue descrito originalmente por Zayas en 1987. La presentación aquí resume el trabajo original que tuvo la intención de introducir y explicar conceptos preliminares relevantes para este estudio (Fenz & Constantino, 2008, pág. 17).

Los aisladores péndulos de fricción simple son dispositivos que cargan verticalmente y transmiten cargas horizontales de una manera predefinida. Cuando la fuerza horizontal aplicada es menor que la fuerza de fricción, no hay movimiento y los aisladores PFS tienen una rigidez elástica muy grande (el comportamiento no es exactamente rígido debido a las pequeñas deformaciones del aislador y el

material deslizante). Esta fuerza de fricción evita el deslizamiento del rodamiento durante la carga de servicio, lo que podría resultar en un desgaste excesivo con el tiempo. Cuando la fuerza horizontal aplicada excede la fuerza de fricción, se inicia el deslizamiento y se aplica el diagrama de cuerpo libre de fuerza de la figura 10 (Fenz & Constantino, 2008, pág. 18).

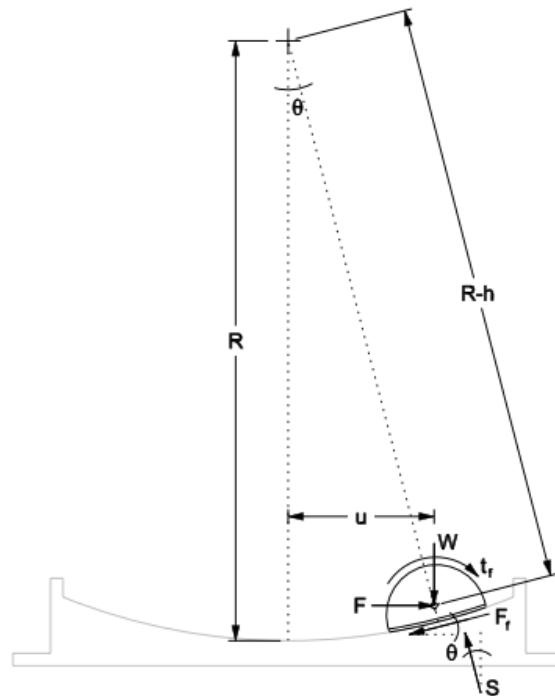


Figura 10 Diagrama de cuerpo libre del aislador FPS en la configuración deformada
Fuente: (Fenz & Constantino, 2008, pág. 18)

La relación fuerza-desplazamiento se deriva del equilibrio y la geometría del deslizador en la configuración desplazada. En este estado, las fuerzas que actúan sobre el deslizador son:

- La carga vertical, W .
- La fuerza horizontal, F .
- La fuerza de fricción, $F_f = \mu W$.
- La fuerza resultante de la presión normal que actúa a lo largo de la interfaz deslizante, S .

- e) Tracciones de fricción a lo largo de la superficie esférica o el deslizador articulado, t_f .

Haciendo equilibrio de fuerzas, se tiene:

$$\sum F_x = 0 \quad F - S \cdot \sin(\theta) - F_f \cdot \cos(\theta) = 0 \quad (8)$$

$$\sum F_y = 0 \quad W - S \cdot \cos(\theta) + F_f \cdot \sin(\theta) = 0 \quad (9)$$

Por geometría, el desplazamiento horizontal (u) viene dado por:

$$u = R_{eff} \cdot \sin(\theta) \quad (10)$$

Donde R_{eff} es el radio efectivo, es la distancia radial desde el centro de la superficie esférica hasta el punto de pivote del deslizador articulado.

Combinando las ecuaciones 8, 9 y 10, la relación de fuerza-desplazamiento que gobierna el movimiento para el aislador PFS único es:

$$F = \frac{W}{R_{eff} \cdot \cos(\theta)} \cdot u + \frac{F_f}{\cos(\theta)} \quad (11)$$

En general el radio de curvatura (R), es relativamente mayor al desplazamiento horizontal (u) por lo que se puede asumir que $\cos(\theta) \approx 1$:

$$F = \frac{W}{R_{eff}} \cdot u + F_f \quad (12)$$

Esta simplificación introduce menos del 5% de error, siempre que el desplazamiento horizontal sea inferior al 30% del radio de curvatura.

Reconociendo que la fuerza de fricción siempre se opondrá al movimiento, la relación de fuerza-desplazamiento cíclica basada en la ecuación (12) se muestra en la figura 11. Tras la inversión del movimiento, el deslizador se descarga rígidamente en $2F_f$ y se desliza en la dirección correcta con una rigidez post-elástica de W/R_{eff} .

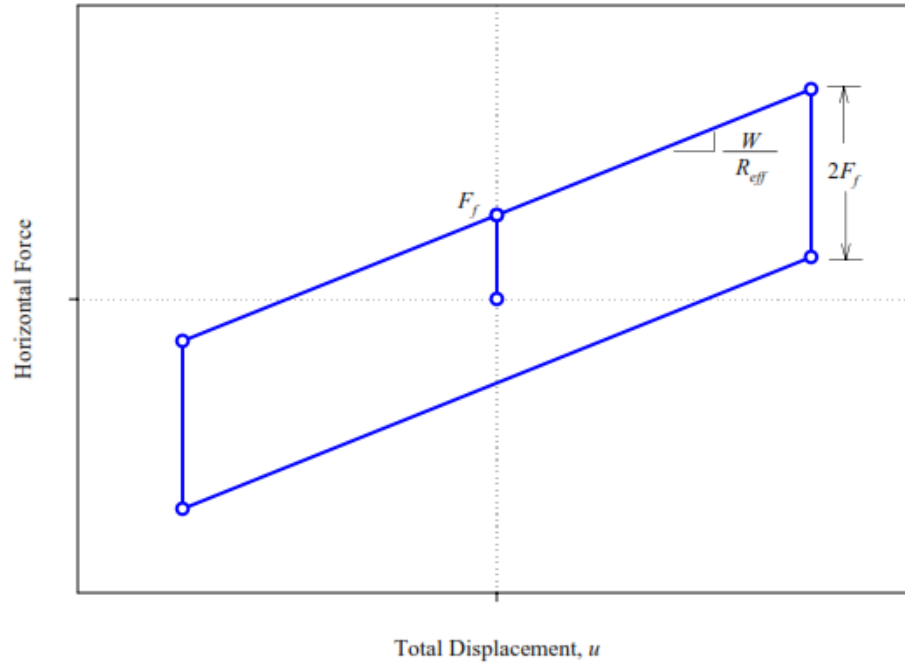


Figura 11 Comportamiento histerético del aislador péndulo de fricción simple
Fuente: (Fenz & Constantinou, 2008, pág. 20)

Y la rigidez post-elástica viene dada por:

$$K_2 = \frac{W}{R_{eff}} \quad (13)$$

La rigidez elástica K_1 en base a muchos experimentos que se han realizado alrededor de este sistema se ha determinado que es normalmente al menos 100 veces la rigidez postfluencia K_2 (Farzad & Kelly, 1999, pág. 108). Tomando en cuenta lo dicho podemos calcular el desplazamiento de fluencia D_y a través de la siguiente ecuación:

$$D_y = \frac{F_f}{K_1 - K_2} \cong \frac{F_f}{99 \cdot K_2} = \frac{\mu \cdot W}{99 \cdot \frac{W}{R}} = \frac{\mu \cdot R}{99} \quad (14)$$

A simple vista se puede intuir a través de esta ecuación que el desplazamiento de fluencia es un valor muy pequeño.

La rigidez efectiva viene dada por la siguiente ecuación:

$$K_{eff} = \frac{W}{R} + \frac{\mu \cdot W}{u} \quad (15)$$

Debido a que el desplazamiento de fluencia D_y es mucho menor que el desplazamiento de diseño u , el área del ciclo de histéresis W_D puede calcularse, aproximadamente, haciendo uso de la siguiente ecuación:

$$W_D = 4 \cdot F_f \cdot (u - D_y) \cong 4 \cdot F_f \cdot u = 4 \cdot u \cdot \mu \cdot W \quad (16)$$

El amortiguamiento efectivo está dado por:

$$\beta_{eff} = \frac{4 \cdot \mu \cdot W \cdot u}{2 \cdot \pi \cdot \left[\frac{W}{R} + \frac{\mu \cdot W}{u} \right] \cdot u^2} = \frac{2 \cdot \mu}{\pi \cdot \left(\frac{u}{R} + \mu \right)} \quad (17)$$

Algunos datos interesantes que también se pueden conseguir de este tipo de estructura son:

Periodo para un péndulo:

$$T = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{R}{g}} \quad (18)$$

La forma aproximada para el desplazamiento vertical indica que el desplazamiento vertical es aproximadamente el cuadrático del desplazamiento horizontal.

$$\delta_v = \frac{u^2}{2 \cdot R} \quad (19)$$

Otro aspecto de los PFS es que, si el desplazamiento es menor que un cierto factor del radio, la fuerza de recuperación puede ser menor que la fuerza de fricción y el sistema no se volverá a centrar.

Este factor se obtiene mediante la ecuación de los dos términos en la ecuación de fuerza. Por lo tanto, el sistema no será recentrado si $D/R < u$. Esto puede ser un problema en sistemas de largo período (Farzad & Kelly, 1999, pág. 103).

6.2. Análisis Estructural De Edificaciones Aisladas Según El Proyecto De Norma Técnica De Aislamiento Sísmico E.031

En esta sección del presente trabajo se hace una extracción del proyecto de Norma Técnica Aislamiento Sísmico E.031 del Perú.

6.2.1. Procedimiento De Fuerzas Estáticas Equivalentes

6.2.1.1. Desplazamientos Laterales Considerados Para El Diseño

6.2.1.1.1. Desplazamiento Traslacional

El sistema de aislamiento debe ser diseñado y construido para soportar, como mínimo, el desplazamiento máximo, D_M , determinado utilizando los límites superiores e inferiores de las propiedades, en la dirección más crítica para la respuesta horizontal, calculado con la siguiente ecuación:

$$D_M = \frac{S_{AM} \cdot T_M^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot B_M} \quad (20)$$

$$S_{AM} = 1.5 \cdot Z \cdot C \cdot S \cdot g \quad (21)$$

Donde:

S_{AM} : Ordenada del espectro elástico de pseudo aceleraciones correspondiente al sismo máximo.

T_M : Período efectivo de la estructura sísmicamente aislada, asociado al desplazamiento traslacional D_M en la dirección de análisis.

B_M : Factor de amortiguamiento, correspondiente a la razón entre la ordenada espectral para 5% de amortiguamiento y la ordenada espectral para el amortiguamiento efectivo β_M correspondiente al desplazamiento traslacional D_M .

Tabla N° 5 Factor de amortiguamiento B_M	
Amortiguamiento Efectivo, β_M (En porcentaje del amortiguamiento crítico) a,b	Factor B_M
≤ 2	0,8
5	1,0
10	1,2
20	1,5
30	1,7
≥ 40	1,9

Donde:

- a: β_M se basará en el amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento determinado en concordancia con los requisitos del numeral 12.5.
- b: Para valores de β_M diferentes de los indicados en la tabla, el factor B_M se obtendrá por interpolación lineal.

Figura 12 Factor de amortiguamiento BM (Tabla N°5 – E.031)

Fuente: Ministerio De Vivienda, 2018, pág. 28

6.2.1.1.2. *Período Efectivo Correspondiente Al Desplazamiento Traslacional*

El periodo efectivo de la estructura aislada, T_M , correspondiente al desplazamiento traslacional, D_M , debe determinarse usando los límites superior e inferior de las características de deformación del sistema de aislamiento, con la siguiente ecuación:

$$T_M = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{P}{K_M \cdot g}} \quad (22)$$

Donde:

P: Peso de la estructura sobre la interfaz de aislamiento.

K_M : Rigidez efectiva (secante) del sistema de aislamiento en la dirección de análisis.

g: Aceleración de la gravedad.

6.2.1.1.3. Desplazamiento Total

- a) El desplazamiento total, D_{TM} , de los elementos del sistema de aislamiento debe incluir el desplazamiento adicional debido a la torsión real y accidental, calculado con la distribución espacial de la rigidez lateral del sistema de aislamiento y la ubicación más desfavorable de la masa excéntrica.
- b) El desplazamiento total, D_{TM} , de los elementos de un sistema de aislamiento no debe ser menor que lo prescrito en las siguientes ecuaciones:

$$D_{TM} = D_M \left[1 + \left(\frac{y}{P_T^2} \right) + \left(\frac{12 \cdot e}{b^2 + d^2} \right) \right] \quad (23)$$

Nota: El desplazamiento total, D_{TM} , no será menor que $1.15D_M$.

Donde:

D_{TM} : Desplazamiento traslacional en el centro de rigidez del sistema de aislamiento, en la dirección de análisis.

y: Distancia entre el centro de rigidez del sistema de aislamiento y el elemento de interés, medida perpendicularmente a la dirección de la sollicitación sísmica considerada.

b: Dimensión menor de la proyección en planta de la estructura, medida perpendicularmente a la dimensión mayor, d .

d: Dimensión mayor de la proyección en planta de la estructura.

e: Excentricidad obtenida como la suma de la distancia en planta entre el centro de masa de la estructura sobre la interfaz de aislamiento y el centro de rigidez del sistema de aislamiento, más la excentricidad accidental, tomada como 5% de la mayor dimensión en planta del edificio en dirección perpendicular a la de la fuerza sísmica considerada.

P_T : Razón entre el período traslacional efectivo del sistema de aislamiento y el período rotacional efectivo del sistema de aislamiento; calculada mediante un análisis dinámico o como se indica en la ecuación siguiente ecuación, pero no requiere ser menor que 1:

$$P_T = \frac{1}{r_a} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{r_a} (x^2 + y^2)}{N}} \quad (24)$$

Donde:

r_a : Radio de giro del sistema de aislamiento, en mm, el cual es igual a $\frac{1}{12}(b^2 + d^2)^{1/2}$ en sistemas de aislamiento con planta rectangular de dimensiones $b \times d$.

N : número de aisladores

x_i, y_i : Distancias horizontales entre el centro de masas del sistema de aislamiento y el aislador i -ésimo, medidas en las direcciones de los ejes del sistema de aislamiento.

6.2.1.2. Fuerzas Laterales Mínimas Consideras Para El Diseño

6.2.1.2.1. Sistema De Aislamiento Y Elementos Estructurales Bajo El Nivel De Base

- a) El sistema de aislamiento, la cimentación, y todos los elementos estructurales bajo el nivel de base deberán ser diseñados y contruidos para resistir una fuerza sísmica lateral mínima, V_b , usando todos los requisitos aplicables para estructuras no aisladas y como se indica en la ecuación 25, considerando los límites superior e inferior de las propiedades del sistema de aislamiento:

$$V_b = K_M \cdot D_M \quad (25)$$

K_M : Rigidez efectiva (secante) del sistema de aislamiento en la dirección horizontal de análisis.

D_M : Desplazamiento traslacional en el centro de rigidez del sistema de aislamiento, en la dirección de análisis.

- b) V_b no podrá ser menor que la máxima fuerza que pueda desarrollarse en el sistema de aislamiento en cualquier desplazamiento, incluyendo el desplazamiento traslacional D_M .
- c) Las cargas sobre los elementos del sistema de aislamiento, la cimentación, y los elementos estructurales por debajo del nivel de base debidas al momento de volteo originado por la fuerza sísmica lateral V_b se calculan con la distribución vertical de las fuerzas, excepto que debe usarse la fuerza lateral sísmica de diseño no reducida, V_{st} , en lugar de V_s en la ecuación 30.

6.2.1.2.2. *Elementos Estructurales Sobre El Nivel De Base*

- a) La estructura por encima del nivel de base debe ser diseñada y construida utilizando todos los requisitos aplicables para una estructura no aislada, para una fuerza de corte mínima, V_s , determinada considerando los límites superior e inferior de las propiedades del sistema de aislamiento, como se indica en la siguiente ecuación:

$$V_s = \frac{V_{st}}{R_a} \quad (26)$$

Donde:

R_a : Coeficiente de reducción de las fuerzas sísmicas para la estructura sobre el sistema de aislamiento, calculado como $\frac{3}{8}R_0$, pero no menor que 1 ni mayor que 2.

R_0 : Coeficiente básico de reducción de las fuerzas sísmicas para la estructura sobre base fija, dependiente de las características de la estructura, definido en la Norma Técnica de Diseño Sismorresistente E.030.

V_{st} : Fuerza cortante no reducida actuante sobre los elementos por encima del nivel de base, como se indica en la ecuación 27.

- b) La fuerza cortante no reducida actuante sobre los elementos por encima del nivel de base V_{st} se determina utilizando tanto los límites superiores como inferior de las propiedades del sistema de aislamiento y como se indica en la siguiente ecuación:

$$V_{st} = V_b \left(\frac{P_s}{P} \right)^{(1-2.5\beta_M)} \quad (27)$$

$$\beta_M = \frac{E_M}{2 \cdot \pi \cdot K_M \cdot D_M^2} \quad (28)$$

Donde:

P : Peso sísmico de la estructura sobre la interfaz de aislamiento, determinado según la Norma Técnica de Diseño Sismorresistente E.030.

P_s : Peso sísmico efectivo de la estructura sobre la interfaz de aislamiento, calculado en forma similar a P , pero sin incluir el nivel de base.

β_M : Amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento para el desplazamiento traslacional D_M (expresado como fracción del amortiguamiento crítico).

- c) Cuando la distancia promedio desde la parte superior del aislador a la parte inferior de la estructura del diafragma del nivel de base de aislamiento exceda de 900 mm, el peso sísmico efectivo P_s se toma igual a P
- d) Excepcionalmente, para los sistemas de aislamiento cuyo comportamiento histerético se caracteriza por una transición abrupta desde el comportamiento pre-fluencia (o pre-deslizamiento) al comportamiento post-fluencia (o post-deslizamiento), el exponente $(1-2.5 \beta_M)$ en la ecuación 27 es reemplazado por $(1-3.5 \beta_M)$.

6.2.1.2.3. Límites De V_s

El valor de la fuerza cortante en la base sobre el sistema de aislamiento, V_s , debe ser mayor o igual que el máximo valor de los numerales siguientes:

- a) La fuerza sísmica lateral requerida por la norma técnica E.030 “Diseño Sismorresistente” vigente para una estructura con base fija, con un peso igual al peso sísmico efectivo P_s y un período igual al período del sistema de aislamiento T_M calculado con las propiedades correspondientes al límite superior.
- b) La fuerza cortante en la base correspondiente a la carga de viento de diseño factorada.
- c) La fuerza lateral sísmica, V_{st} y con V_b igual a la fuerza requerida para activar plenamente el sistema de aislamiento utilizando la mayor de:

- * Las propiedades del sistema de aislamiento correspondientes al límite superior.
- * 1,5 veces las propiedades nominales, requeridas para activar completamente el sistema de aislamiento.
- * La capacidad máxima de un sistema "fusible" de restricción al viento.
- * La fuerza de fricción de ruptura de un sistema de deslizamiento, o
- * La fuerza para cero desplazamientos de un sistema de deslizamiento después de un ciclo dinámico completo de movimiento de amplitud D_M .

6.2.1.2.4. *Distribución Vertical De La Fuerza*

- a) La fuerza sísmica lateral V_s debe distribuirse entre los distintos niveles de la estructura sobre el sistema de aislamiento usando las ecuaciones siguientes:

$$F_1 = (V_b - V_{st})/R_a \quad (29)$$

$$F_i = \frac{p_i \cdot h_i^k}{\sum_{j=2}^n p_j \cdot h_j^k} V_s \quad i > 1 \quad (30)$$

$$k = 14 \cdot \beta_M \cdot T \quad (31)$$

F_1 : Fuerza sísmica lateral en el nivel de base.

F_i : Fuerza sísmica lateral en el nivel i .

h_i : Altura del nivel i respecto al nivel de base.

n : Número de pisos de la estructura sobre la interfaz de aislamiento.

p_i : Parte del peso P que se ubica en o se asigna al nivel i .

R_a : Coeficiente de reducción de las fuerzas sísmicas para la estructura sobre el sistema de aislamiento, calculado como $\frac{3}{8}R_0$, pero no menor que 1 ni mayor que 2.

T : Período fundamental de la estructura considerada con base fija, en la dirección de análisis.

V_b : Fuerza cortante total en el sistema de aislamiento o en los elementos bajo el nivel de aislamiento.

V_s : Fuerza cortante en la base de la estructura sobre el sistema de aislamiento.

V_{st} : Fuerza cortante no reducida actuante sobre los elementos por encima del nivel de base.

β_M : Amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento para el desplazamiento traslacional (expresado como fracción del amortiguamiento crítico).

- b) En lugar de las ecuaciones 26 y 30, se permite calcular la fuerza sísmica lateral F_i como el promedio de las fuerzas obtenidas para el nivel i en la dirección de análisis, utilizando un modelo simplificado de acoplamiento cercano con una representación concentrada del sistema de aislamiento, mediante análisis tiempo-historia escalados para V_b / R_a al nivel de base.

6.2.1.2.5. Límites De La Deriva

- a) La máxima deriva en la estructura por encima del nivel de base no debe exceder de 0,0035.

- b) Esta deriva es calculada multiplicando los resultados de un análisis lineal elástico por R_a .

6.2.2. Procedimiento De Análisis Dinámicos

6.2.2.1. Descripción De Procedimientos

Los procedimientos de análisis modal espectral y análisis tiempo-historia se deben realizar de acuerdo a la norma técnica E.030 de “Diseño Sismorresistente” vigente.

6.2.2.2. Solicitación Sísmica

El sismo máximo considerado se debe usar para calcular las fuerzas laterales, los desplazamientos de la superestructura, el desplazamiento total del sistema de aislamiento, las fuerzas en las unidades de aislamiento, las fuerzas en sus conexiones y las fuerzas en el sistema de vigas que se ubican sobre y por debajo del sistema de aislamiento para resistir el efecto P-Delta.

6.2.2.3. Procedimiento Modal Espectral

Para el análisis modal espectral se emplea un valor de amortiguamiento modal para el modo fundamental en la dirección de interés que no sea mayor que el amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento o 30% del amortiguamiento crítico, el que sea menor.

Los valores de amortiguamiento modal para los otros modos deben ser seleccionados consistentemente con aquellos valores correspondientes a la estructura con base fija.

El análisis modal espectral de cada dirección debe efectuarse empleando el espectro al 100% en la dirección de análisis más el 30% en la dirección perpendicular.

En cada dirección de análisis, el desplazamiento máximo del sistema de aislamiento debe calcularse como la suma vectorial de los dos desplazamientos ortogonales.

6.2.3. Análisis Tiempo-Historia

Este procedimiento se debe desarrollar con un conjunto de pares de registros del movimiento del terreno que deben ser seleccionados y escalados según lo indicado en Norma Técnica de Diseño Sismorresistente E.030 y el Proyecto de Norma Técnica de Aislamiento Sísmico E.031.

Cada par de componentes del movimiento de terreno debe ser aplicado simultáneamente al modelo considerando la orientación y la ubicación de la excentricidad de la masa más desfavorable.

El desplazamiento máximo del sistema de aislamiento debe ser calculado mediante la suma vectorial de los dos desplazamientos ortogonales en cada instante de tiempo.

Los parámetros de interés deben ser calculados para cada movimiento del terreno usado para el análisis tiempo-historia y el valor promedio de los parámetros de respuesta de interés debe ser empleado para el diseño.

Para zonas cercanas a una falla geológica, cada par de componentes horizontales se debe rotar y ubicar en la dirección paralela y perpendicular a la falla, y aplicarse al edificio en cada orientación. En otros casos no es necesario aplicar las componentes en múltiples orientaciones.

6.2.3.1. Excentricidad Accidental De La Masa

La respuesta torsional ocasionada por la falta de simetría de masa y rigidez debe ser considerada en el análisis.

Cada una de las dos direcciones ortogonales de análisis debe considerarse, por separado, la excentricidad accidental consistente en el desplazamiento del centro de masa de la posición calculada en una magnitud igual a 5% de la dimensión del diafragma.

6.2.3.2. Fuerzas Y Desplazamientos Laterales Mínimos

6.2.3.2.1. Sistema De Aislamiento Y Elementos Estructurales En La Subestructura

El sistema de aislamiento, la cimentación y todos los elementos estructurales de la subestructura deben ser diseñados usando todos los requerimientos apropiados para una estructura no aislada y las fuerzas obtenidas del análisis dinámico sin reducción.

Esta fuerza lateral de diseño para el sistema de aislamiento, la subestructura y la cimentación, no debe ser menor a 90% de V_b .

El desplazamiento total del sistema de aislamiento debido al sismo máximo considerado, no debe ser menor que el 80% de D_{TM} . Pudiendo usar D'_M en lugar de D_M .

$$D'_M = \frac{D_M}{\sqrt{1 + \left(\frac{T}{T_M}\right)^2}} \quad (32)$$

6.2.3.2.2. Elementos Estructurales Sobre El Sistema De Aislamiento

Los elementos estructurales sobre el sistema de aislamiento deben ser diseñados usando los requerimientos para una estructura no aislada y las fuerzas obtenidas de un análisis dinámico reducidas por R_a .

Para el procedimiento modal espectral, la fuerza cortante de diseño en cualquier piso no debe ser menor a la fuerza de corte que resulta de la aplicación de fuerzas según el cálculo en la ecuación 30 y un valor de V_b igual a la cortante basal obtenida por el procedimiento modal espectral en la dirección de interés.

Para el análisis tiempo-historia en estructuras regulares, el valor de V_b no debe ser tomado menor que el 80% de lo especificado en el numeral 6.2.1.2.1 y el valor de V_s no debe ser tomado menor que el 100% de lo especificado en el numeral 6.2.1.2.3.

Para el análisis tiempo-historia en estructuras irregulares, el valor de V_b no debe ser tomado menor que el 100% de lo especificado en la numeral 6.2.1.2.1 y el valor de V_s no debe ser tomado menor que el 100% de lo especificado en la numeral 6.2.1.2.3.

6.2.3.2.3. Escalamiento De Resultados

Cuando la fuerza cortante lateral de los elementos estructurales, determinada usando el procedimiento modal espectral o el procedimiento de tiempo-historia, es menor que el valor mínimo indicado en los numerales 6.2.1.2.1 y 6.2.1.2.3, las fuerzas en los elementos de la estructura deben ser aumentadas proporcionalmente.

6.2.3.2.4. Límites De Deriva

La deriva máxima de entrepiso correspondiente al SMC y un factor de reducción $R_a=1$, incluyendo el desplazamiento ocasionado por la deformación vertical del sistema de aislamiento, debe cumplir con alguno de los siguientes límites:

La máxima deriva de entrepiso de la superestructura calculado por el análisis modal espectral no debe exceder 0,0035.

La máxima deriva de entrepiso de la superestructura calculado por el análisis tiempo-historia, considerando las características de fuerza deformación no lineales de la interfaz de aislamiento, no debe exceder 0,005.

6.3. Desempeño De Un Edificio Aislado

El desempeño sísmico se cuantifica mediante la deriva y aceleración de entrepisos, estos parámetros están asociados con el nivel de daño que sufriría la estructura después de un evento sísmico.

La metodología HAZUS contiene modelos para estimar las pérdidas que podrían resultar a causas de terremotos.

6.3.1. Niveles de sismo

El manual HAZUS clasifica los niveles de sismo de acuerdo a las zonas sísmicas existentes en la norma norte americana. En términos prácticos, pre diseño se refiere a que el sismo de diseño es inexistente o muy pequeño, mientras que el nivel alto se refiere a un sismo de diseño alto.

6.3.2. Estados de daño

El manual HAZUS la clasifica los estados de daños para pórtico de concreto armado de la siguiente manera.

Estado de daño leve: se presentan fisuras debidas a flexión o corte en algunas vigas y columnas cercanas o dentro de los nudos.

Estado de daño moderado: la mayoría de las vigas y columnas presentan fisuras. En pórticos dúctiles podrían existir elementos que hayan alcanzado la fluencia, mientras que en pórticos no dúctiles podrían presentarse fisuras más grandes debidas al corte.

Estado de daño extendido: en pórticos dúctiles algunos elementos alcanzan su capacidad ultima, se ven fisuras largas debidos a flexión, concreto desconchando y refuerzo pandeado. En pórticos no dúctiles podrían presentarse fallas por cortante, estribos rotos, refuerzo pandeado en columnas y colapso parcial.

Estado de daño completo: La estructura está colapsada o inminente peligro de colapso.

6.3.3. Daño Estructural

En cuanto a daño estructural, este es descrito por valores promedio de derivas correspondientes a diferentes estados de daño: leve, moderado, extendido y completo. En general, estas estimaciones de deriva son diferente para cada tipo de edificio que dependen del tipo de edificación, altura y nivel de diseño sísmico.

En la siguiente tabla se muestran el rango de derivas usadas para nuestra edificación:

Tabla 1
Derivas promedio para determinar el estado de daño en edificaciones aporticadas de 4 a 7 pisos
Adaptado de (HAZUS, 2003, págs. 5-45, 5-46, 5-47, 5-48)

NIVEL DE SISMO DE DISEÑO	ESTADO DE DAÑO			
	LEVE	MODERADO	EXTENDIDO	COMPLETO
ALTO	0.0033	0.0067	0.0200	0.0533
MODERADO	0.0033	0.0058	0.0156	0.0400
BAJO	0.0033	0.0053	0.0133	0.0333
PRE DISEÑO	0.0027	0.0043	0.0107	0.0267

6.3.4. Daño No Estructural – Componentes Sensible A Aceleración

La aceleración de entrepiso es importante en edificaciones de uso hospitalario debido al alto costo que representa el contenido y equipamiento en general con relación al costo total del edificio, en la siguiente tabla se muestran el rango de aceleraciones:

Tabla 2
Picos de Aceleración de entrepiso (g) para definir el nivel de daño ni estructural de componentes sensible a aceleraciones
Adaptado de (HAZUS, 2003, págs. 5-54)

NIVEL DE SISMO DE DISEÑO	ESTADO DE DAÑO			
	LEVE	MODERADO	EXTENDIDO	COMPLETO
ALTO	0.30	0.60	1.20	2.40
MODERADO	0.25	0.50	1.00	2.00
BAJO	0.20	0.40	0.80	1.60
PRE DISEÑO	0.20	0.40	0.80	1.60

De la tabla anterior podemos limitar para nuestro caso en estudio la aceleración máxima de entrepiso al 30% de la gravedad.

6.3.5. Relación De Costos De Reparación

El costo de reparación está relacionado con el uso de la edificación, en el siguiente cuadro se aprecia los valores extraídos del Manual de HAZUS:

Tabla 3
Índice de costos de reparación para hospitales (% de costo total del edificio)
Adaptado de (HAZUS, 2003, págs. 15-11, 15-12 y 15-13)

TIPO DE REPARACIÓN	ESTADO DE DAÑO			
	LEVE	MODERADO	EXTENDIDO	COMPLETO
ELEMENTOS ESTRUCTURALES	0.20	1.40	7.00	14.00
ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES SENSIBLES A ACELERACIÓN	1.00	5.10	15.40	51.30
ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES SENSIBLES A DERIVAS	0.80	3.50	17.40	34.70

7. Diagnóstico De La Situación Y Desarrollo

7.1. Descripción De Sitio

Lima capital del Perú está comprendido entre una de las regiones de más alta actividad sísmica que existe en la tierra, por lo tanto, está expuesto a este peligro, que trae consigo la pérdida de vidas humanas y económicas. Es necesario efectuar estudios sobre técnicas de protección sísmica que permitan reducir el riesgo sísmico, tales como los aisladores sísmicos, conocer el comportamiento de estos dispositivos ayudara a disminuir los grandes efectos que trae consigo los terremotos.

7.2. Efecto De Los Sismos En Las Estructuras De Base Empotrada

Altas aceleraciones de entrepiso ocasionan el daño en el equipamiento del edificio.

Las deformaciones y distorsiones de entrepiso ocasionan el daño en los elementos estructurales y no estructurales

7.3. Diagnóstico De La Situación

La mayor parte de las pérdidas económicas, se deben a los daños en las estructuras. Sin embargo, existe un costo adicional ocasionado por la pérdida de las instalación y equipamiento de los edificios (Computadoras, sistemas eléctricos y electrónicos, insumos, productos, información, etc). Adicionalmente existe el costo por la interrupción de las funciones del edificio.

En un edificio la mayor parte del contenido lo componen los elementos estructurales y el equipamiento.

7.4. Reducción Del Riesgo Sísmico

El Aislamiento Sísmico busca limitar el efecto negativo del sismo interponiendo elementos especiales en la base de la estructura tales que puedan absorber la acción del sismo y al mismo soportar el peso de la estructura.

7.5. Diseño Metodológico

7.5.1. Tipo De Investigación

La presente tesis de investigación, reúne las condiciones metodológicas de una investigación descriptiva y comparativa; descriptiva por que desarrolla una descripción del marco conceptual, características, propiedades y el procedimiento de análisis y diseño de edificaciones con y sin aisladores de base; comparativa por que se desarrollan comparaciones entre una edificación convencional y una edificación con aisladores sísmicos.

7.5.2. Universo, Población y Muestra

7.5.2.1.1. Universo

Una edificación de concreto armado, ubicado en la ciudad Lima.

7.5.2.1.2. Población

Edificación de concreto armado, ubicado en la ciudad Lima.

7.5.3. Descripción De Fuentes De Información

En el presente trabajo de investigación se emplea como técnica de recopilación de información la observación estructurada mediante el registro sistemático, debido a que se modelará la estructura convencional e incluyendo el uso de aisladores

sísmicos, y a partir de ciertos parámetros se hará un análisis comparativo del comportamiento y costos de las edificaciones.

La recolección de la información se enfoca en la búsqueda de planos arquitectónicos para poder realizar la estructuración de la edificación, búsqueda de catálogos de los aisladores para obtener los parámetros necesarios que nos permitan realizar los modelos bilineales de los mismos, también se usara la Norma Técnica de Diseño Sismorresistente E.030, Proyecto de Norma Técnica de Aislamiento Sísmico del Perú E.031 y ASCE 7-16 para realizar el análisis sísmico de las edificaciones con y sin aisladores.

7.5.4. Técnicas De Análisis Y Procesamiento De La Información

Para lograr los objetivos planteados se emplean las técnicas de análisis y diseño de edificaciones planteadas en las normativas peruanas incluso en códigos americanos los cuales incluyen análisis lineales y no lineales de edificaciones, así como las expresiones para el diseño estructural de los elementos que conforman la edificación.

Los resultados del análisis sísmico, el cálculo de las fuerzas internas en los elementos estructurales y el diseño estructural, se obtienen mediante el uso de programas de cómputo como Etabs, Seismo Match, programación de hojas de cálculo en Excel, Mathcad y Matlab.

Finalmente, en el procesamiento de datos se muestra en la generación de tablas y/o gráficos mediante el programa Excel y Matlab.

7.5.5. Procedimiento Metodológico

Para el desarrollo de la presente investigación, una vez recopilada la información bibliográfica, se plasma una descripción del procedimiento metodológico, la cual consta de las siguientes etapas:

- a) Realizar el análisis estático por fuerzas horizontales equivalentes, análisis dinámico modal espectral y análisis tiempo historia no lineal de la edificación convencional.
- b) Diseño de los elementos estructurales de la edificación convencional.
- c) Calcular los parámetros bilineales de los aisladores.
- d) Realizar el análisis estático y análisis tiempo historia no lineal de la edificación considerando aisladores sísmicos.
- e) Diseño de los elementos estructurales de la edificación con aisladores sísmicos.
- f) Comparar el comportamiento y costos de la edificación convencional versus la edificación con aisladores sísmicos.
- g) Desarrollo de conclusiones.

8. Aplicación De La Solución Propuesta Y Resultados Obtenidos

8.1. Análisis Y Diseño De La Edificación Con Base Empotrada

8.1.1. Resumen De Parámetros Sísmicos

$Z = 0.45$ (Zona 4 – Lima)

$S = 1.00$, $T_P = 0.40$, $T_L = 2.50$ (S1: suelo rígido)

$U = 1.50$ (Edificación esencial)

$R_{ox, oy} = 8.00$ (Sistema estructural de pórticos de concreto armado)

$I_a = 1.00$ (No presenta irregularidad en altura)

$I_p = 1.00$ (No Presenta Irregularidad en Planta)

$g = 9.81$ (aceleración de la gravedad)

8.1.2. Vista En Planta Y Altura De La Edificación

La separación entre columnas en el eje X es de 6m y en el eje Y es de 5m, cuenta con columnas de 70cmx70cm hasta el tercer nivel, y columnas de 60cmx60cm en el cuarto y quinto nivel.

Se cuenta con vigas de 30cmx80cm en ambas direcciones hasta el tercer nivel, en el cuarto nivel se cuenta con vigas de 30cmx70cm y en el quinto nivel se cuenta con vigas de 30cmx60cm.

El diafragma rígido está compuesto por una losa aligerada en una dirección de 20cm de espesor.

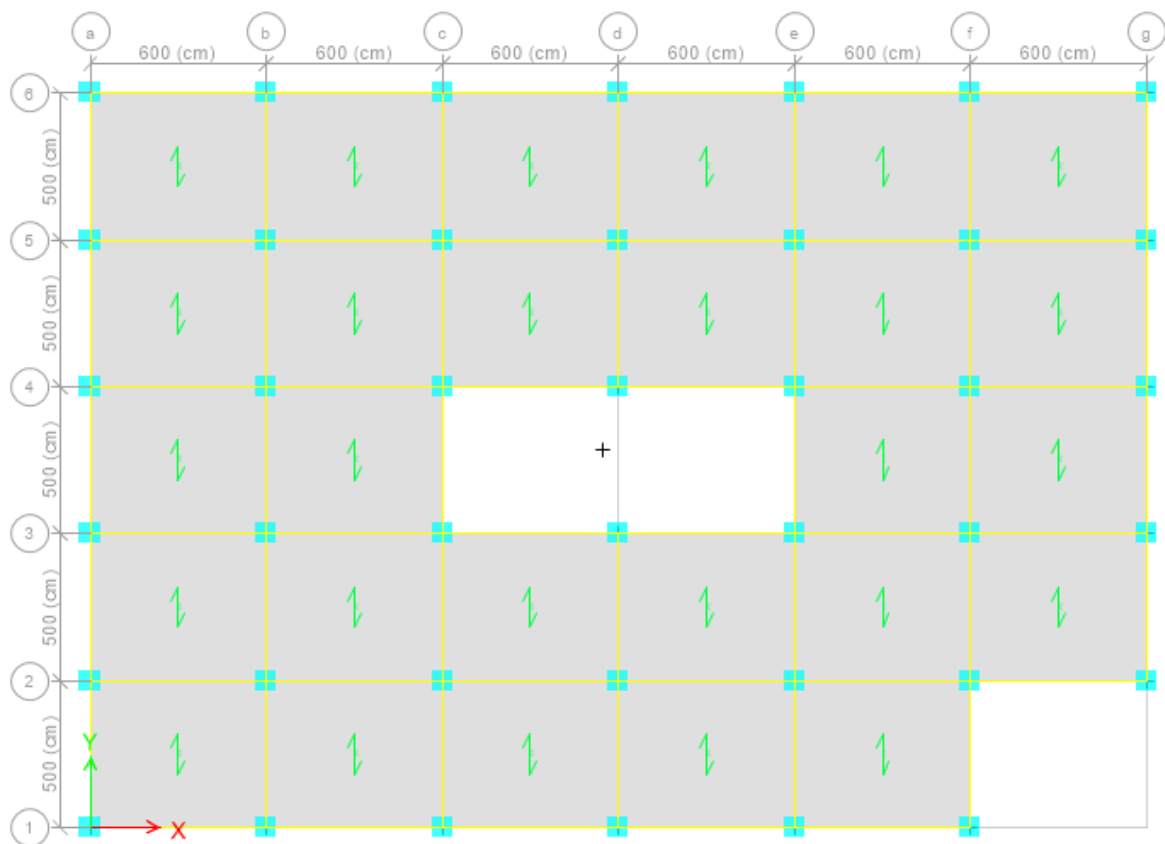


Figura 13 Vista en planta de la estructura
Fuente: propia

La altura del primer nivel es de 4.15m y del segundo al quinto nivel es 3.85m.

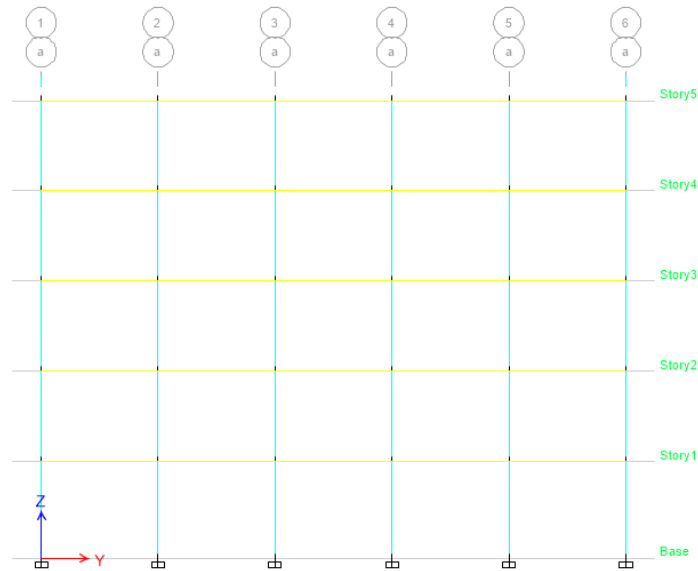


Figura 14 Vista en elevación de la estructura
Fuente: propia

8.1.3. Análisis Por Fuerzas Horizontales Equivalentes

Periodo natural aproximado:

$$T_n = \frac{h_n}{C_t} = \frac{19.55}{35} = 0.56s$$

Factor de amplificación sísmica:

$$C = 2.5 \cdot \frac{T_p}{T_n} = 2.5 \cdot \left(\frac{0.40}{0.56} \right) = 1.79$$

Se debe cumplir que:

$$\frac{C}{R} \geq 0.11 ; \quad \frac{1.70}{8} = 0.22 > 0.11$$

El peso sísmico de la estructura para una edificación esencial se considera el 100% de la carga muerta más 50% de la carga viva en entrepisos más 25% de la carga viva en techos:

Tabla 4
Peso sísmico de la edificación

Nivel	Peso (tonnef)
5	665.70
4	996.36
3	1062.91
2	1062.91
1	1077.37

Cortante basal estática:

$$V = C_b \cdot P$$

$$C_b = \frac{ZUCS}{R} = \frac{0.45 \cdot 1.5 \cdot 1.79 \cdot 1}{8} = 0.1511$$

$$V = 734.92 \text{ tonnef}$$

Distribución de la fuerza sísmica en altura:

$$F_i = \alpha_i \cdot V$$

$$\alpha_i = \frac{P_i \cdot h_i^k}{\sum_{j=1}^n P_j \cdot h_j^k}$$

$$k = 0.75 + 0.50T_n = 1.03$$

Tabla 5
Distribución de la fuerza sísmica en altura

Nivel	h (m)	W x h ^k	α	Fi	Vi
5	19.550	14198.362	0.109	79.986	79.986
4	15.700	28285.945	0.217	159.348	239.335
3	11.850	34715.657	0.266	195.570	434.905
2	8.000	32205.805	0.247	181.431	616.336
1	4.150	21050.081	0.161	118.585	734.921

8.1.4. Análisis Dinámico Modal De Respuesta Espectral

8.1.4.1. Espectro De Pseudo Aceleraciones

El espectro de pseudo aceleración se realizó siguiendo los lineamientos que establece la Norma E.030 de Diseño Sismorresistente, tal como se muestra en la siguiente figura:

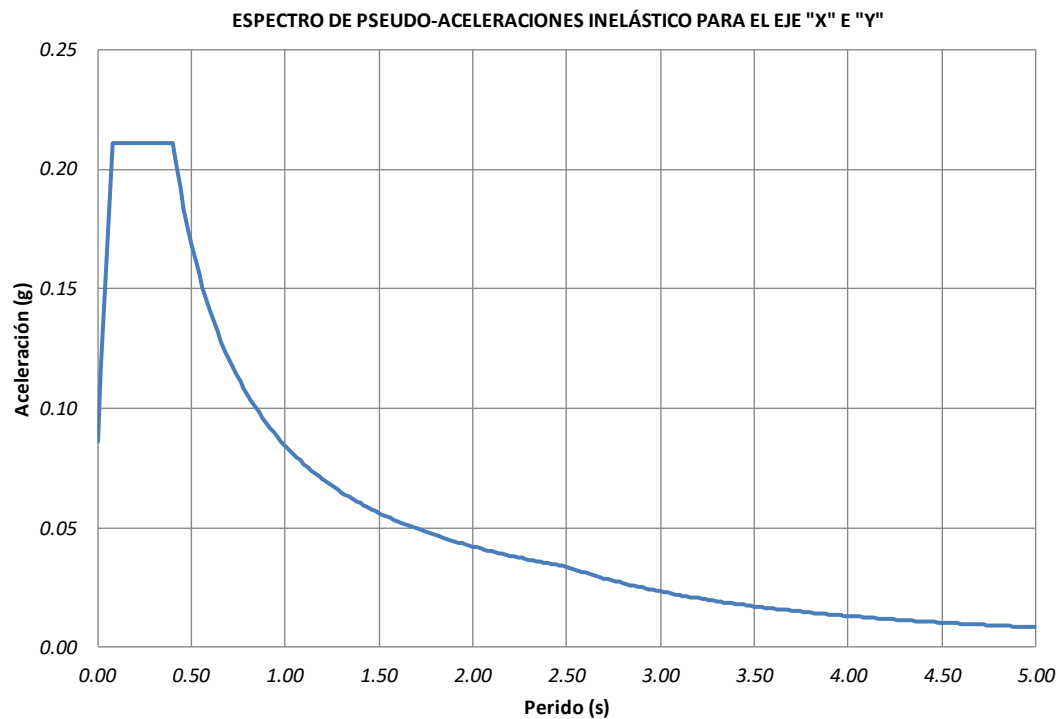


Figura 15 Espectro de pseudo-aceleraciones inelástico
Fuente: propia

8.1.4.2. Modelo Matemático De La Edificación

El modelo matemático se realizó en el programa Etabs:

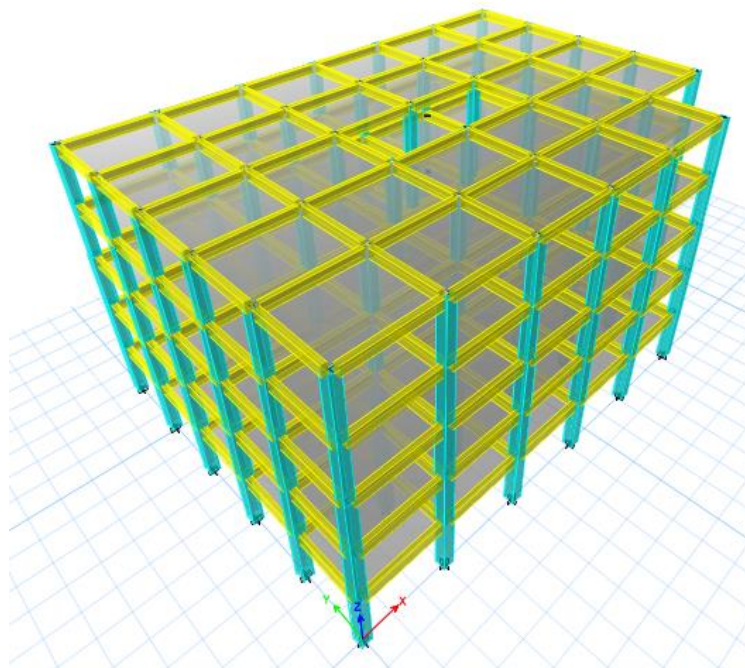


Figura 16 Modelo matemático de la estructura convencional
Fuente: propia

8.1.4.3. *Análisis Modal*

Del análisis modal obtenemos los modos de vibración y la masa participativa de la estructura, como mínimo se debe tomar 3 modos por cada nivel, la norma técnica E.030 nos indica que como mínimo debemos tener el 90% de masa participativa.

Tabla 6
Modos de vibración y masa participativa

Modo	Periodo (S)	Masa participativa en X (%)	Masa participativa en Y (%)	Masa participativa en RZ (%)
1	0.5530	81.96	0.02	0.00
2	0.5340	0.02	82.38	0.00
3	0.4930	0.00	0.00	82.69
4	0.1970	11.12	0.00	0.00
5	0.1890	0.00	11.01	0.00
6	0.1750	0.00	0.00	10.75
7	0.1090	4.16	0.00	0.00
8	0.1060	0.00	3.95	0.00
9	0.0990	0.00	0.00	3.92
10	0.0760	1.87	0.00	0.00
11	0.0750	0.00	1.81	0.00
12	0.0700	0.00	0.00	1.81
13	0.0530	0.87	0.00	0.00
14	0.0530	0.00	0.83	0.00
15	0.0500	0.00	0.00	0.83

De la tabla anterior apreciamos que los dos primeros modos de vibración son traslacionales y el tercer modo es rotacional, lo que es un indicador que la estructura cuenta con un buen pre dimensionamiento, además se nota que la masa participativa en el eje “X” e “Y” son mayores al 90%.

8.1.4.4. *Análisis Espectral*

Del análisis espectral obtenemos las derivas de entrepiso y fuerzas de diseño, además debemos verificar que las derivas sean menores al 0.7%.

Tabla 7
Derivas de entrepiso

Piso	Derivas de entrepiso				Condición	
	Rango Inelástico		Rango Elástico		0.007	0.007
	DriftX	DriftY	DriftXR	DriftYR	X	Y
5	0.000632	0.000633	0.00379	0.003798	Ok	Ok
4	0.000948	0.000969	0.00569	0.00581	Ok	Ok
3	0.000985	0.001022	0.00591	0.00613	Ok	Ok
2	0.001117	0.001165	0.00670	0.00699	Ok	Ok
1	0.000831	0.000882	0.00499	0.00529	Ok	Ok

De la tabla anterior apreciamos que las derivas son menores al 0.7%, por lo tanto, cumplen con lo especificado en la Norma E.030.

Luego verificamos la fuerza cortante basal mínima, la Norma E.030 nos indica que para estructuras regulares el cortante en la base como mínimo deber ser el 90% del cortante estático.

Tabla 8 Verificación del cortante mínimo

Dir. Analisis	Fza Cortante Estatico Vest. (tn)	80% de la Fza Cortante Estatico Vest. (tn)	Cortantes Dinamicas Vdin. (tn)	Factorar en:
Direccion X-X	774.54	619.63	918.77	9.81
Direccion Y-Y	774.54	619.63	887.39	9.81

De la tabla anterior apreciamos que el cortante basal dinámico es mayor que el cortante basal estático, por lo tanto, no es necesario amplificar el cortante dinámico para el diseño de los elementos estructurales.

8.1.5. Análisis Dinámico Tiempo Historia No Lineal

Se usarán 7 registros sísmicos, los cuales se muestran a continuación:

Sismo Lima 1966 E-W

Duración: 197.64 s

PGA: -175.42 Gal (cm/s/s)

Fuente: Instituto Geofísico del Perú

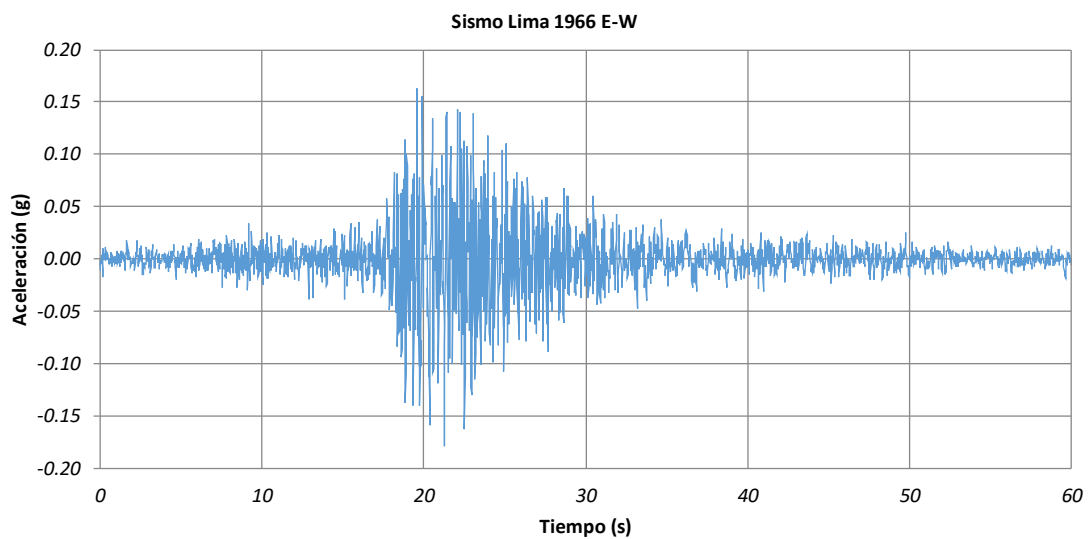


Figura 17 Sismo Lima 1966 E-W
Fuente: propia

Sismo Lima 1966 N-S

Duración: 197.64 s

PGA: -267.85 Gal (cm/s/s)

Fuente: Instituto Geofísico del Perú

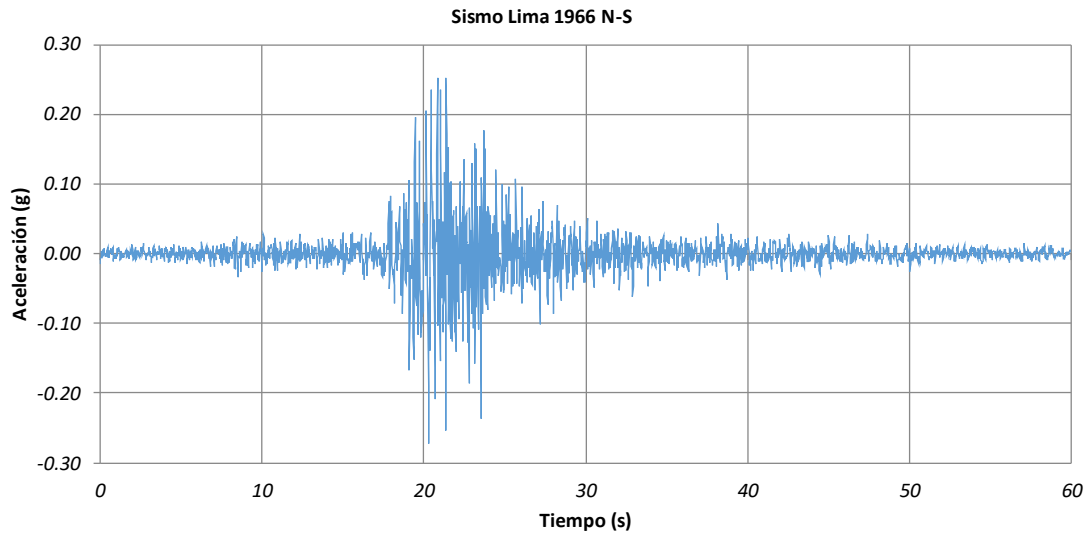


Figura 18 Sismo Lima 1966 N-S
Fuente: propia

Sismo Lima 1970 E-W

Duración: 45.16 s

PGA: -104.28 Gal (cm/s/s)

Fuente: Instituto Geofísico del Perú

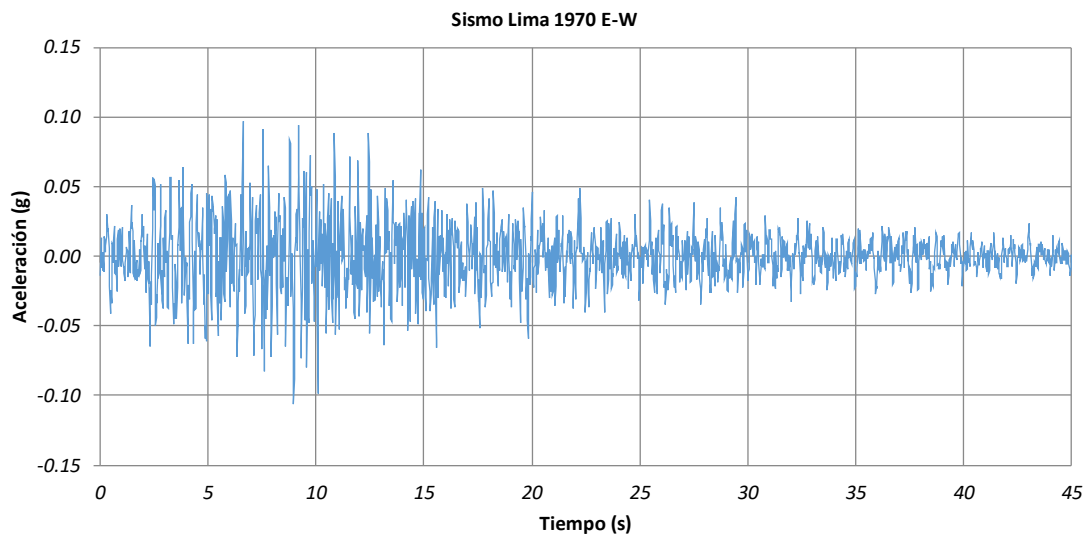


Figura 19 Sismo Lima 1970 E-W
Fuente: propia

Sismo Lima 1970 N-S

Duración: 45.16 s

PGA: -99.50 Gal (cm/s/s)

Fuente: Instituto Geofísico del Perú

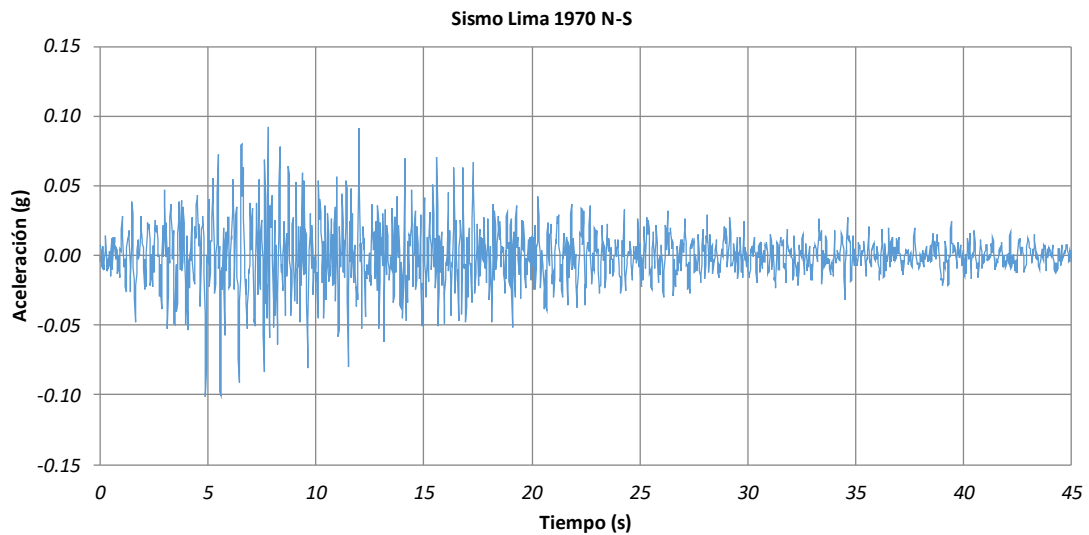


Figura 20 Sismo Lima 1970 N-S
Fuente: propia

Sismo Lima 1974 E-W

Duración: 97.96 s

PGA: -190.36 Gal (cm/s/s)

Fuente: Instituto Geofísico del Perú

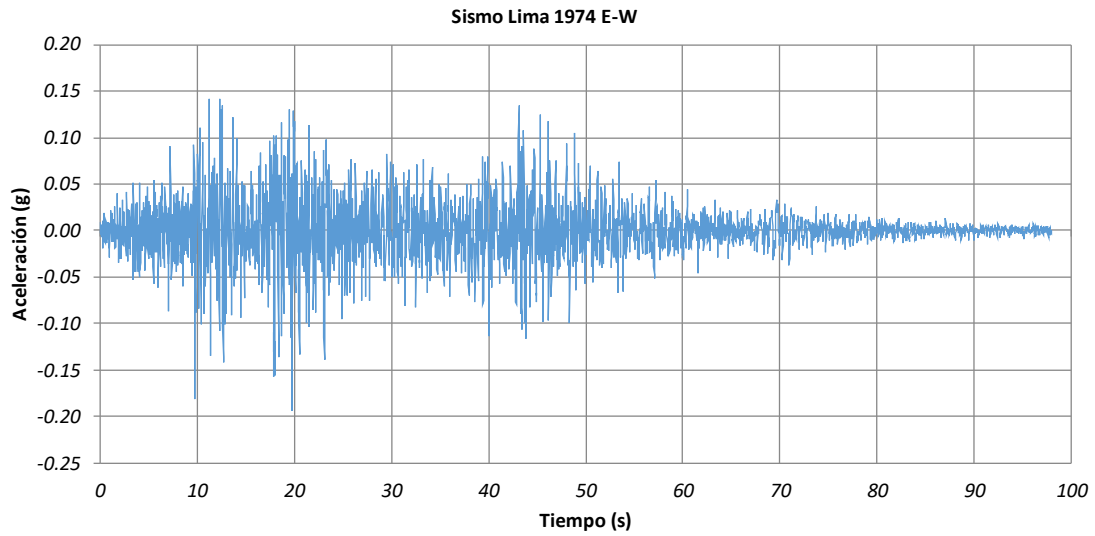


Figura 21 Sismo Lima 1974 E-W
Fuente: propia

Sismo Lima 1974 N-S

Duración: 97.96 s

PGA: 169.37 Gal (cm/s/s)

Fuente: Instituto Geofísico del Perú

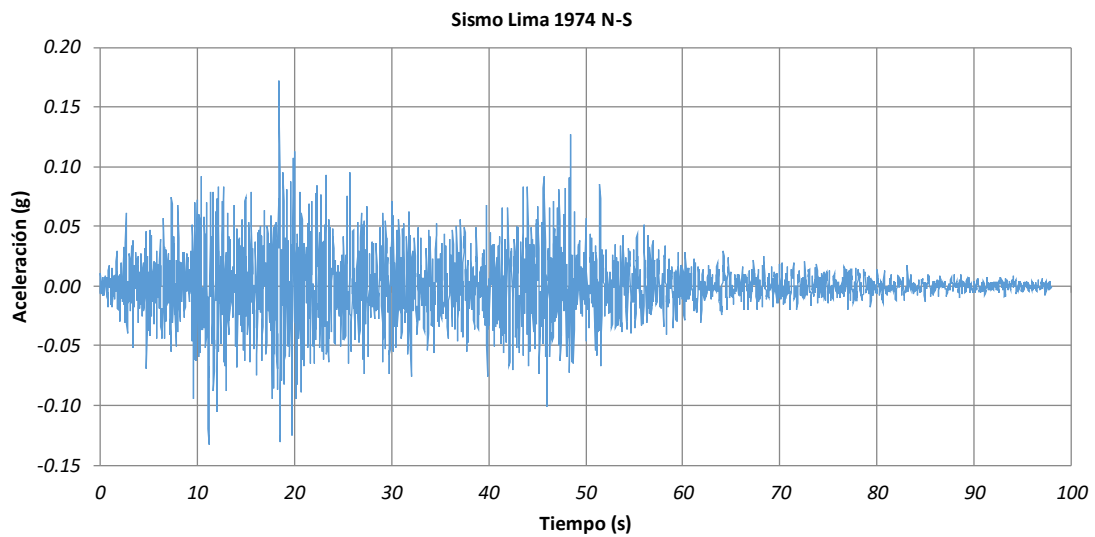


Figura 22 Sismo Lima 1974 N-S
Fuente: propia

Sismo Ica 2007 E-W

Duración: 218.06 s

PGA: -291.97 Gal (cm/s/s)

Fuente: Instituto Geofísico del Perú

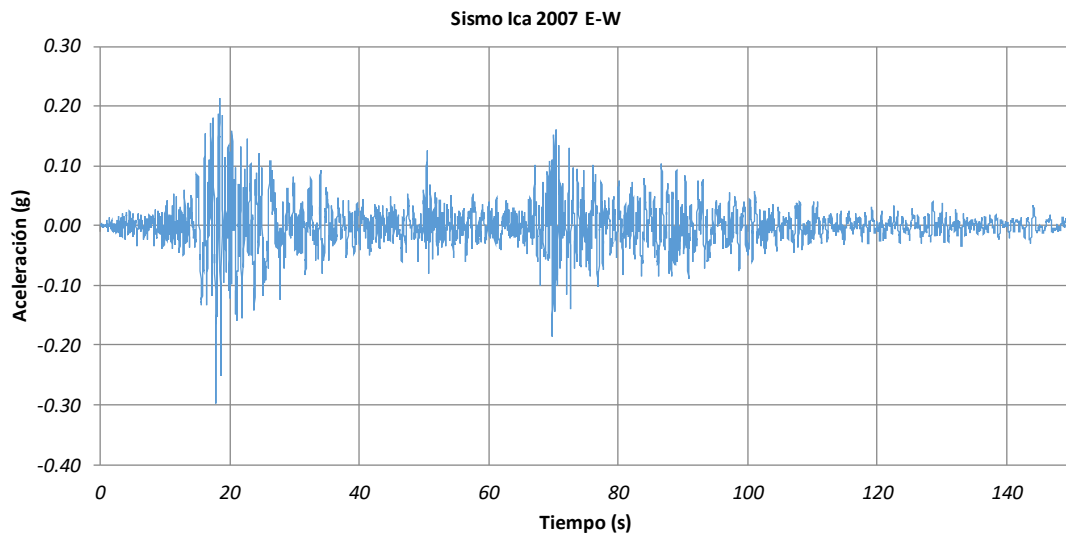


Figura 23 Sismo Ica 2007 E-W
Fuente: propia

Sismo Ica 2007 N-S

Duración: 218.06 s

PGA: 364.51 Gal (cm/s/s)

Fuente: Instituto Geofísico del Perú

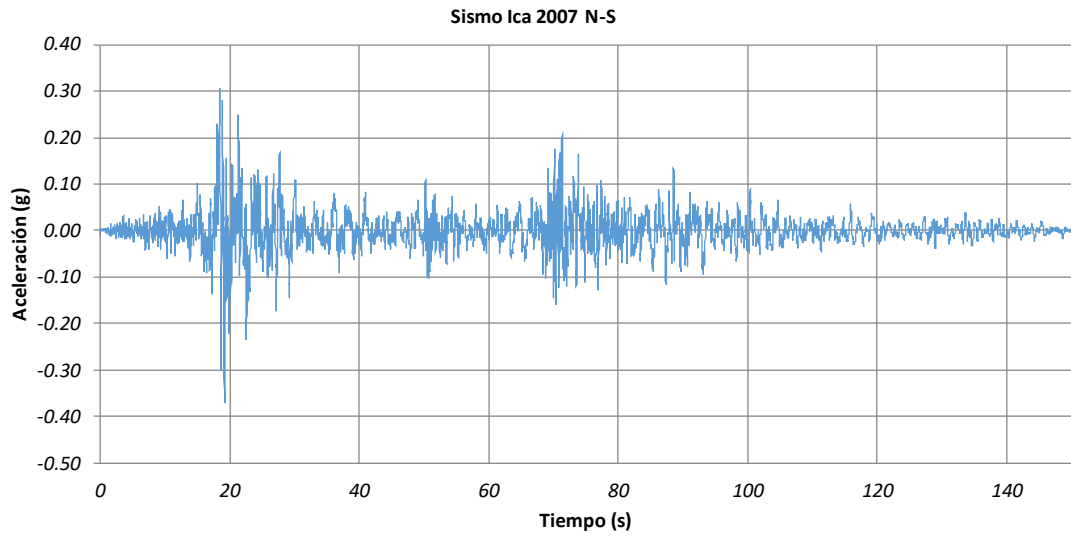


Figura 24 Sismo Ica 2007 N-S
Fuente: propia

Sismo Cañete 1974 E-W

Duración: 97.94 s

PGA: 190.31 Gal (cm/s/s)

Fuente: Instituto Geofísico del Perú

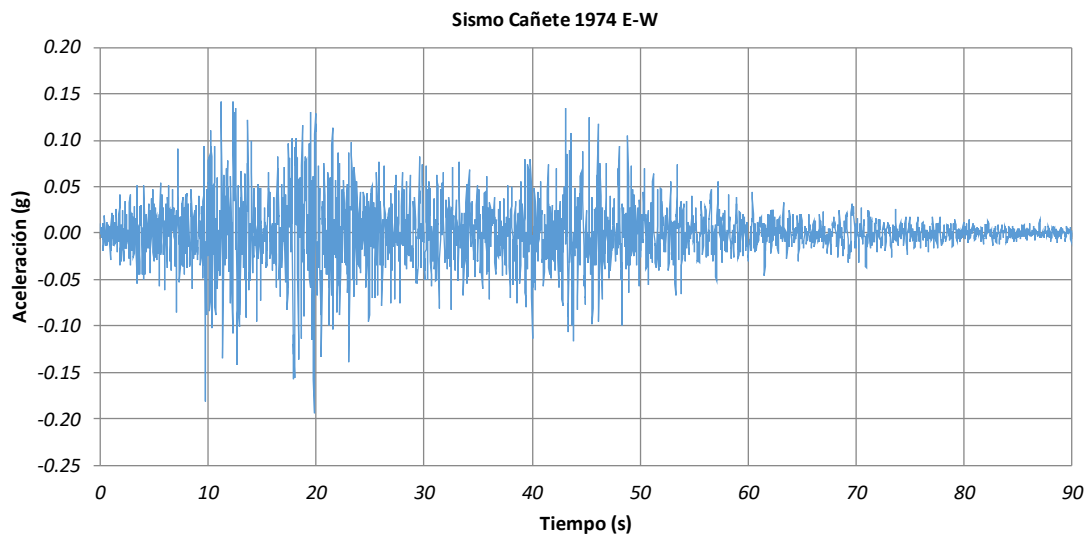


Figura 25 Sismo Cañete 1974 E-W
Fuente: propia

Sismo Cañete 1974 N-S

Duración: 97.94 s

PGA: 169.71 Gal (cm/s/s)

Fuente: Instituto Geofísico del Perú

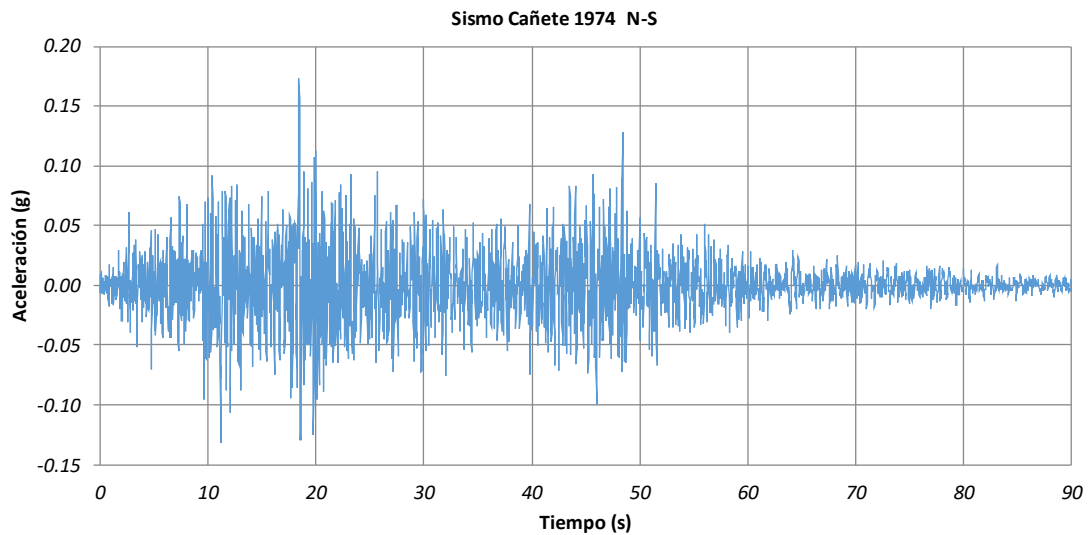


Figura 26 Sismo Cañete 1974 N-S
Fuente: propia

Sismo Huacho 1966 E-W

Duración: 65.62 s

PGA: 175.60 Gal (cm/s/s)

Fuente: Instituto Geofísico del Perú

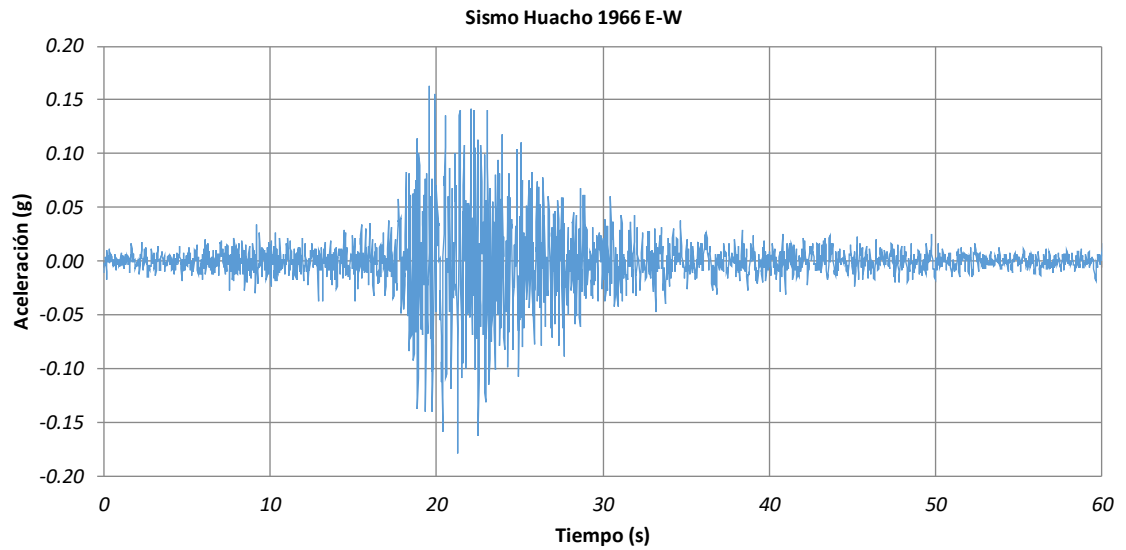


Figura 27 Sismo Huacho 1966 E-W
Fuente: propia

Sismo Huacho 1966 N-S

Duración: 65.60 s

PGA: 267.81 Gal (cm/s/s)

Fuente: Instituto Geofísico del Perú

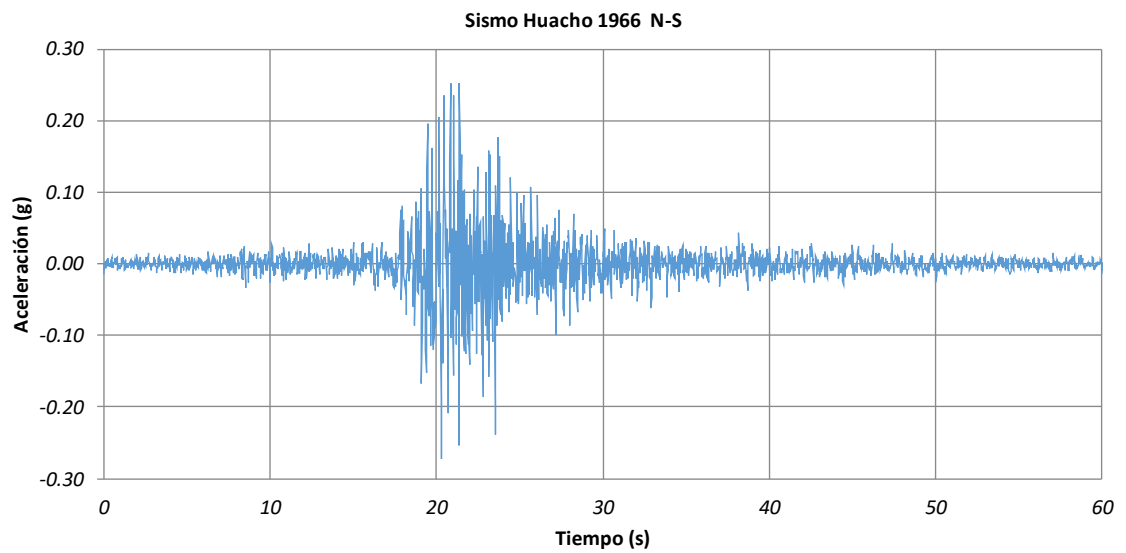


Figura 28 Sismo Huacho 1966 N-S
Fuente: propia

Sismo Huaraz 1970 E-W

Duración: 45.12 s

PGA: 103.99 Gal (cm/s/s)

Fuente: Instituto Geofísico del Perú

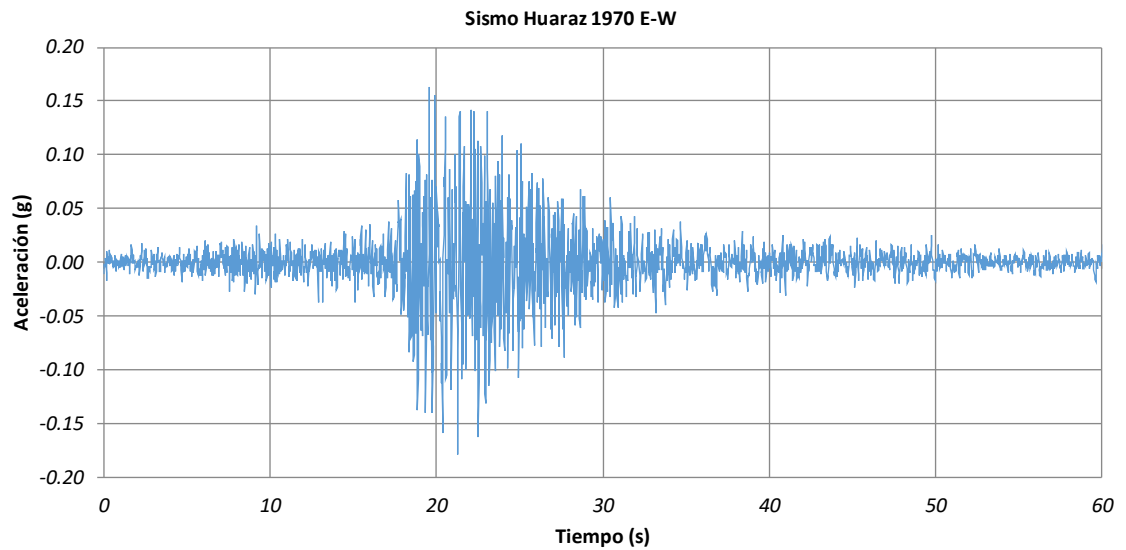


Figura 29 Sismo Huaraz 1970 E-W
Fuente: propia

Sismo Huaraz 2007 N-S

Duración: 45.12 s

PGA: 90.25 Gal (cm/s/s)

Fuente: Instituto Geofísico del Perú

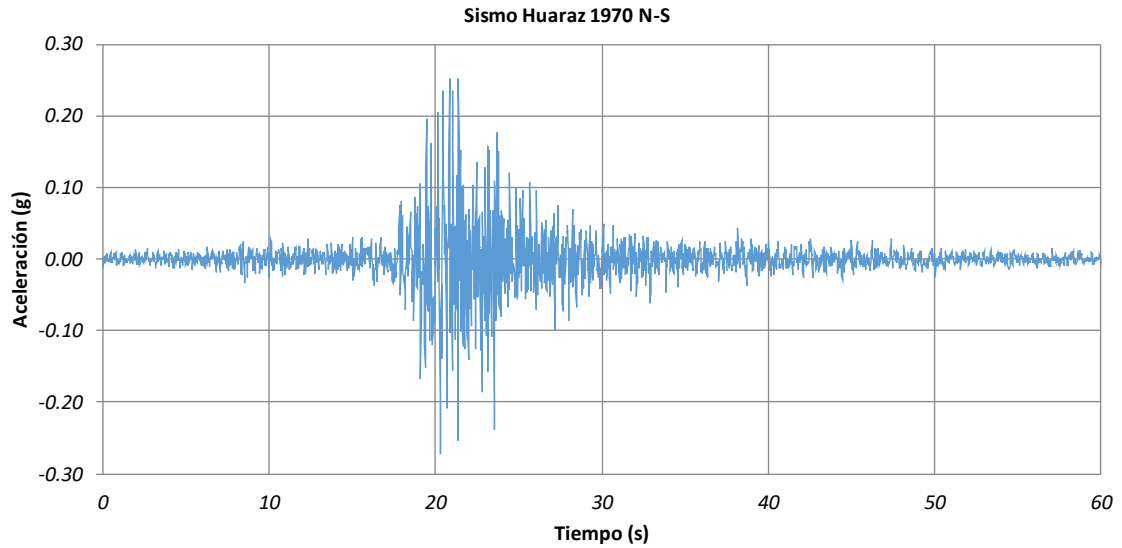


Figura 30 Sismo Huaraz 1970 N-S
Fuente: propia

8.1.5.1. Espectro Objetivo

La norma ASCE 7-16 y el proyecto de norma E.031 nos indican que el espectro objetivo será el sismo máximo considerado (periodo de retorno $T_r=2475$ años).

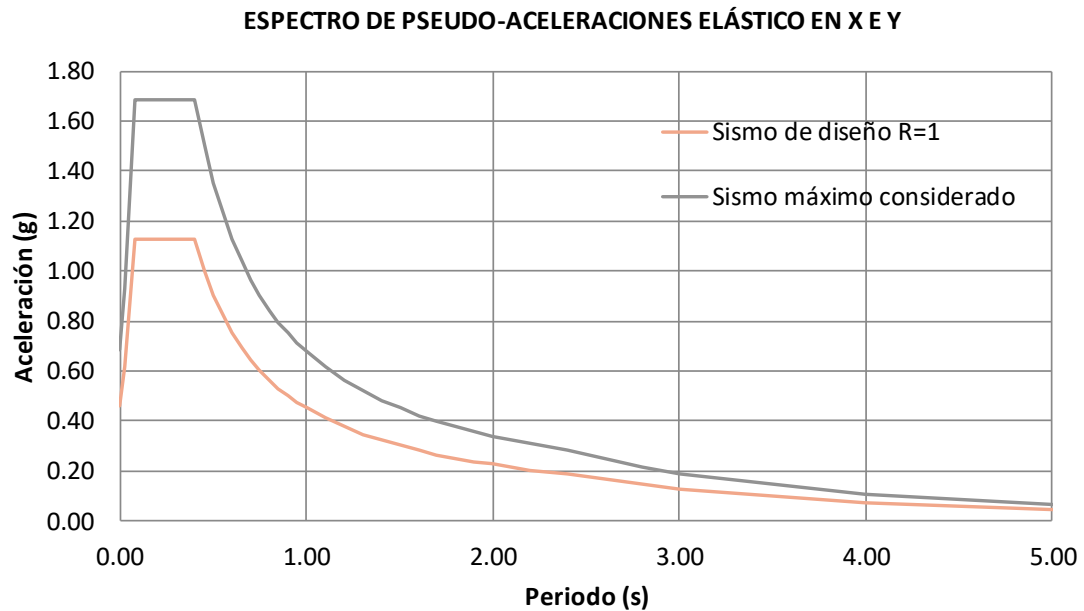


Figura 31 Comparación del espectro de pseudo-aceleraciones del sismo severo vs sismo máximo considerado
Fuente: propia

8.1.5.2. Escalamiento De los Registros Sísmicos

Para realizar en análisis tiempo historia no lineal es necesario realizar el escalamiento de los registros sísmicos al espectro objetivo, para lo cual primero se realiza la corrección de la línea base de la señal, corrección por filtrado y luego se escala.

En la siguiente figura podemos apreciar un registro sísmico obtenido directamente del acelerógrafo:

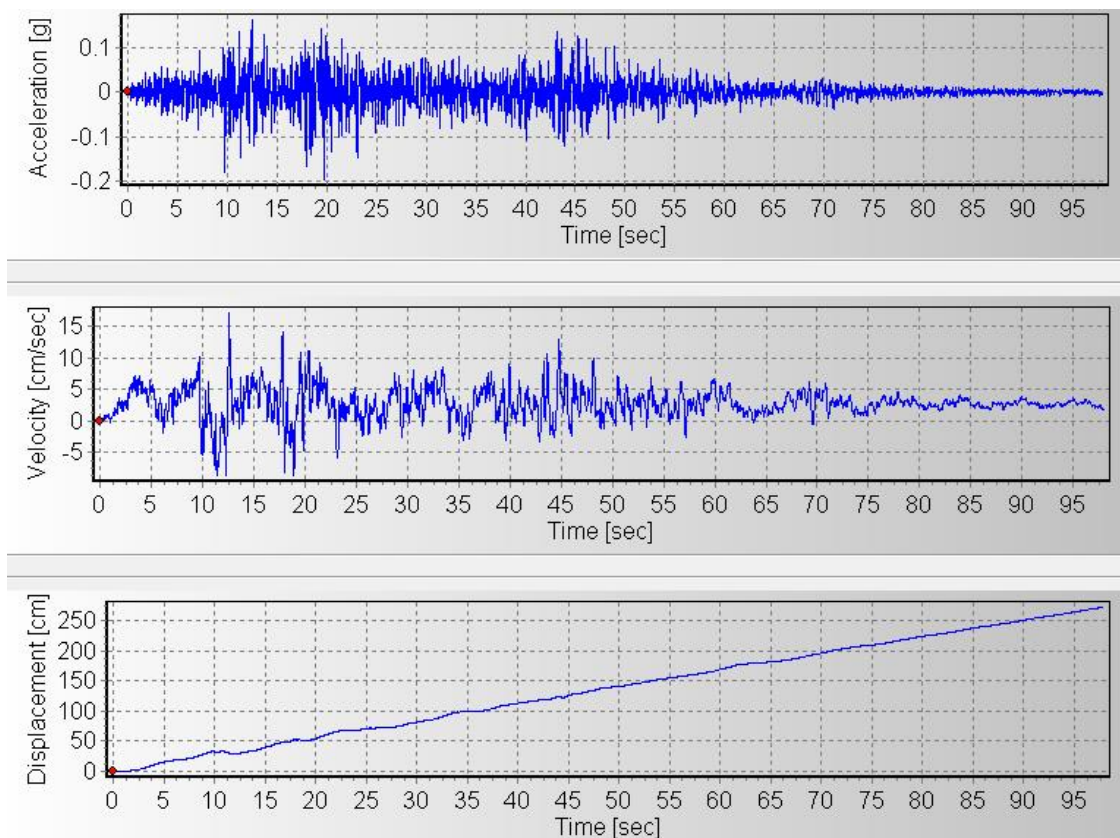


Figura 32 Registro sísmico obtenido del acelerógrafo
Fuente: propia

En la siguiente figura podemos apreciar el registro sísmico corregido y filtrado:

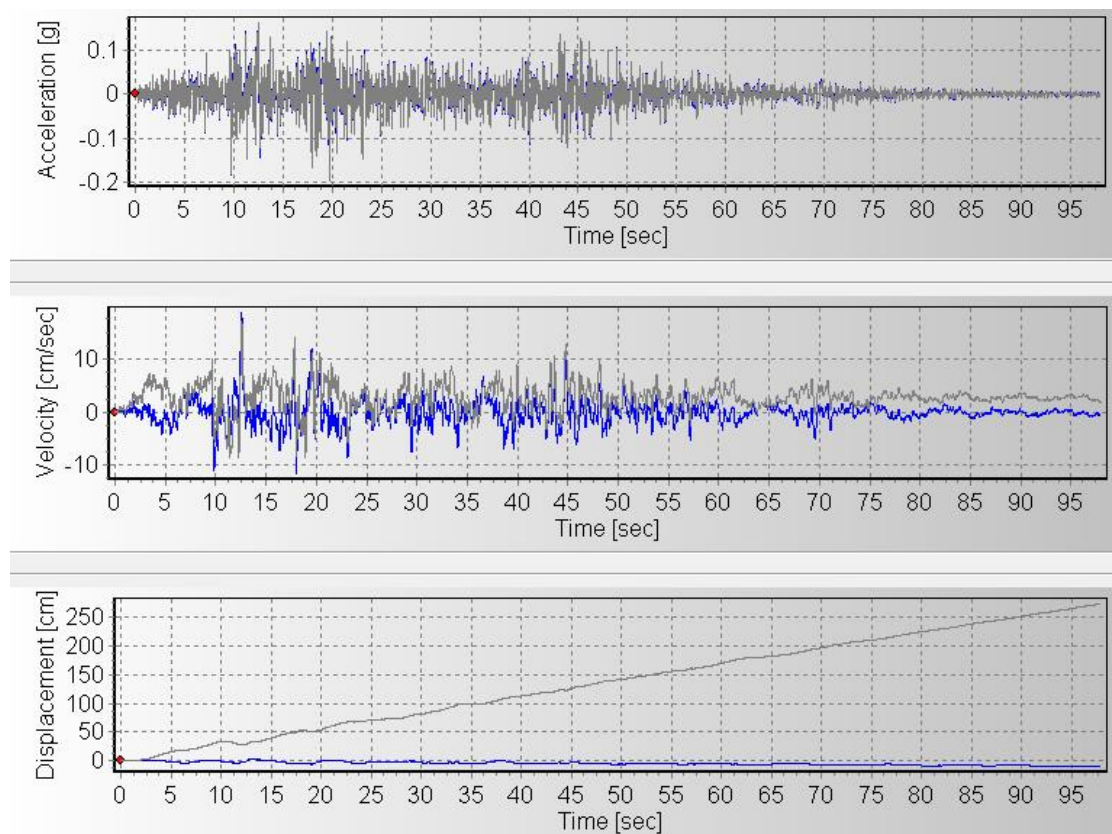


Figura 33 Registro sísmico corregido y filtrado
Fuente: propia

En la siguiente figura podemos apreciar la comparación entre el sismo original y el sismo escalado al espectro de objetivo:

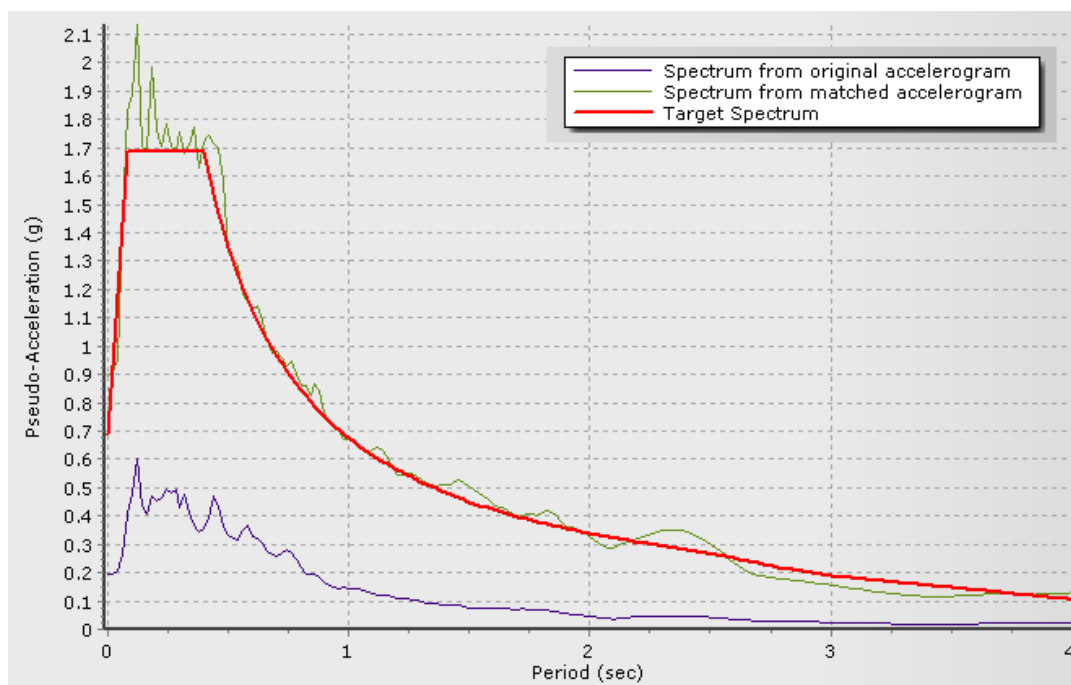


Figura 34 Registro sísmico escalado al espectro de objetivo
Fuente: propia

8.1.5.3. Desplazamientos Y Derivas

A continuación, se muestran los desplazamientos:

Tabla 9
Desplazamientos de la edificación con base empotrada

DESPLAZAMIENTOS		
NIVEL	X-X (m)	Y-Y (m)
5	0.13255	0.11944
4	0.11418	0.10467
3	0.08649	0.08108
2	0.05778	0.05478
1	0.02565	0.02465

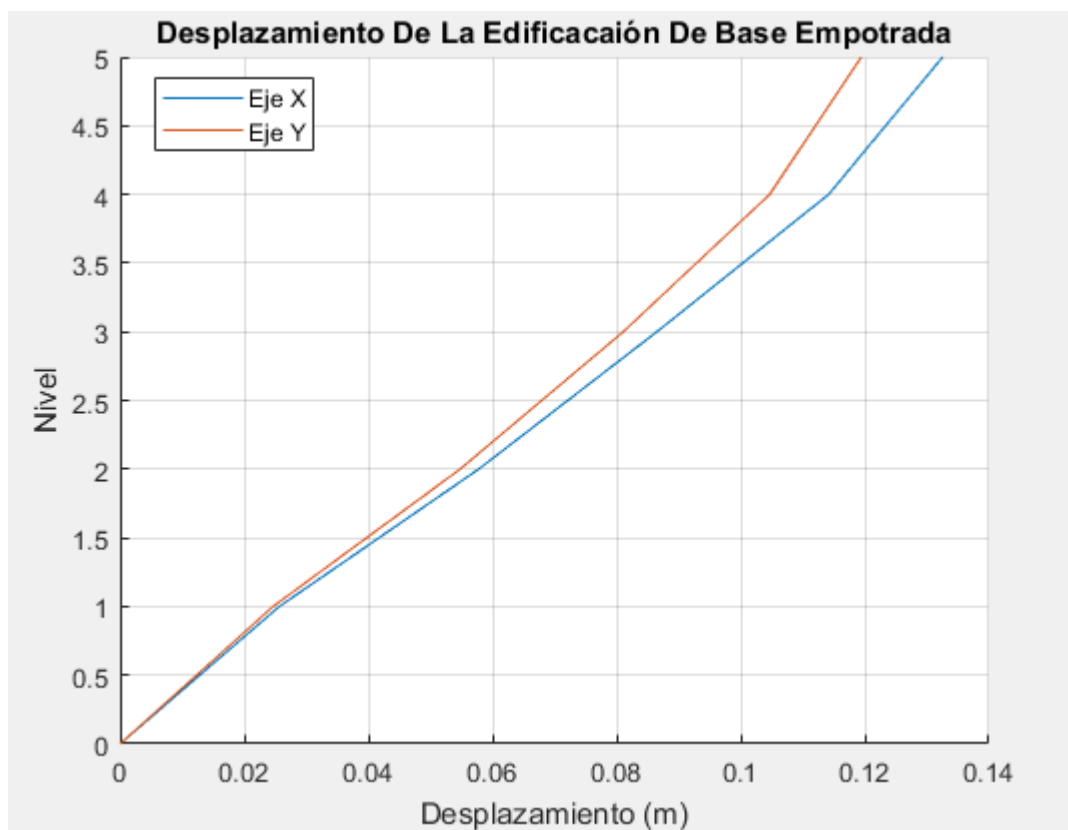


Figura 35 Desplazamiento de la edificación de base empotrada
Fuente: propia

A continuación, se muestran las derivas de entrepiso:

Tabla 10
Derivas de la edificación con base empotrada

DERIVAS		
NIVEL	X-X	Y-Y
5	0.00477	0.00383
4	0.00719	0.00613
3	0.00746	0.00683
2	0.00835	0.00783
1	0.00666	0.00640

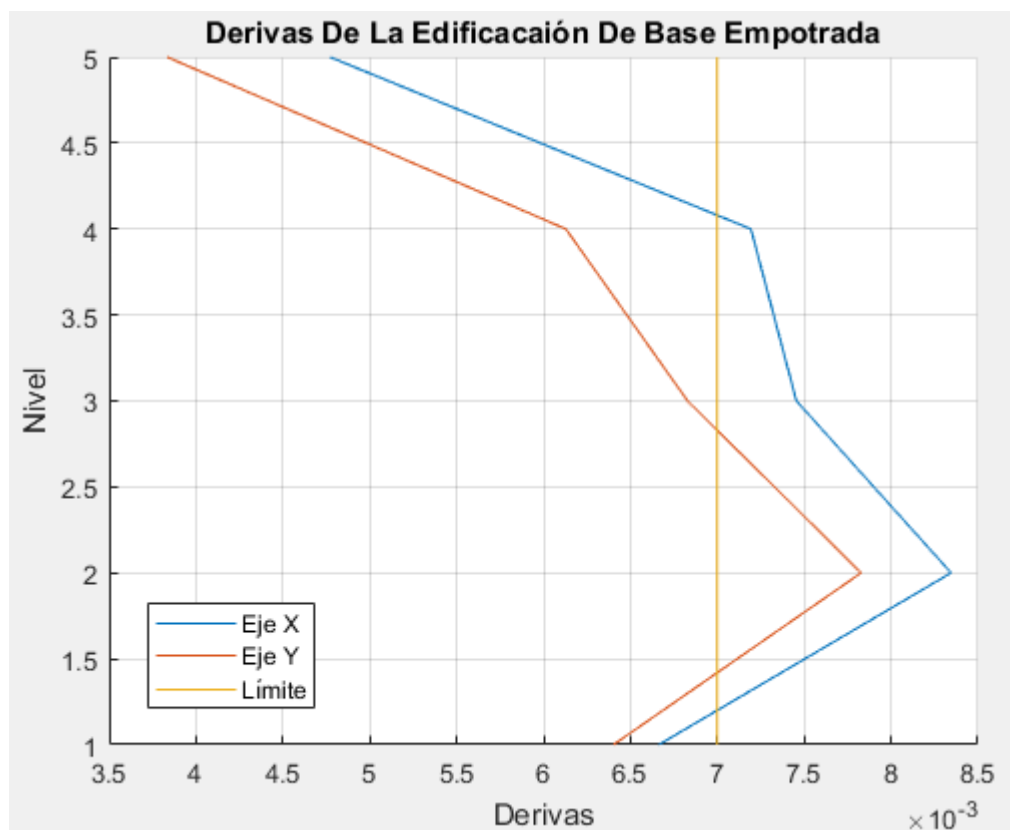


Figura 36 Derivas de la edificación de base empotrada
Fuente: propia

De la tabla anterior podemos apreciar que la estructura no cumple con la deriva límite.

8.1.5.4. Aceleraciones Absolutas

A continuación, se muestran las aceleraciones absolutas en cada piso.

Tabla 11
Aceleraciones absolutas de la edificación con base empotrada

ACELERACION ABSOLUTA		
NIVEL	X-X (g)	Y-Y (g)
5	2.16	2.12
4	1.65	1.58
3	1.27	1.29
2	1.09	1.14
1	0.79	0.80

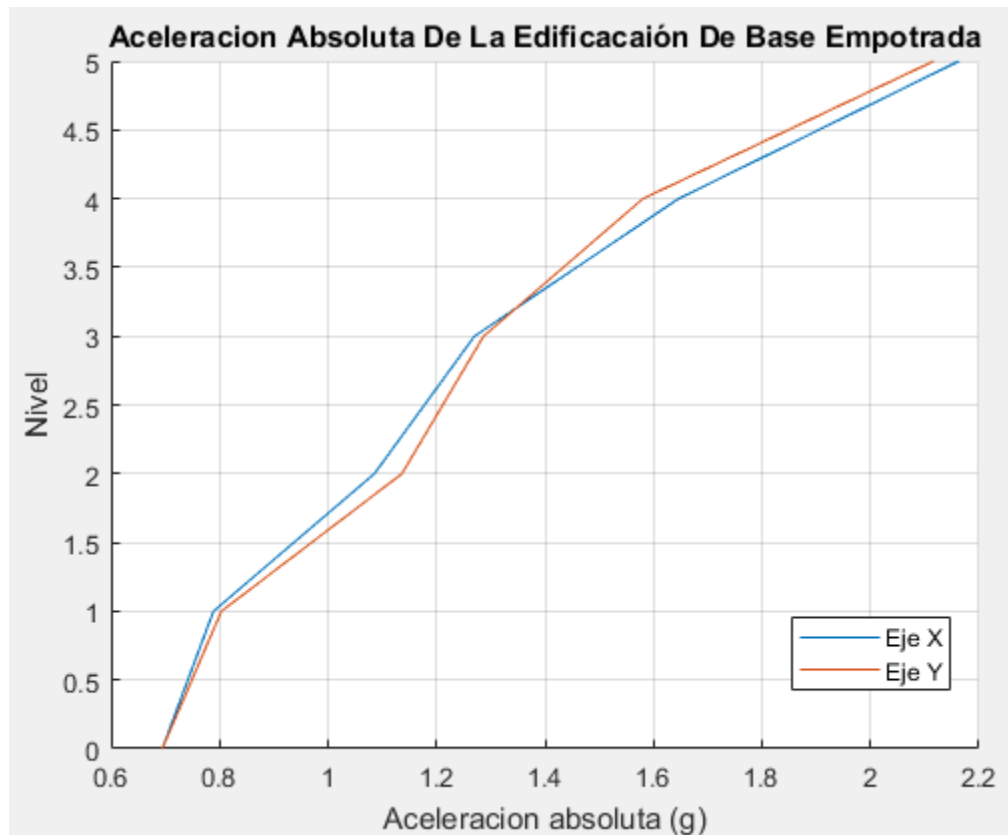


Figura 37 Aceleración absoluta de la edificación de base empotrada
Fuente: propia

8.1.5.5. Fuerzas Cortantes

A continuación, se muestran las fuerzas cortantes en cada piso.

Tabla 12
Fuerza cortante en cada entrepiso de la edificación con base empotrada

FUERZA CORTANTE		
NIVEL	X-X (Tn)	Y-Y (Tn)
5	1281.80	1244.21
4	2774.76	2666.25
3	3829.02	3733.46
2	4498.64	4548.13
1	4890.27	4923.66

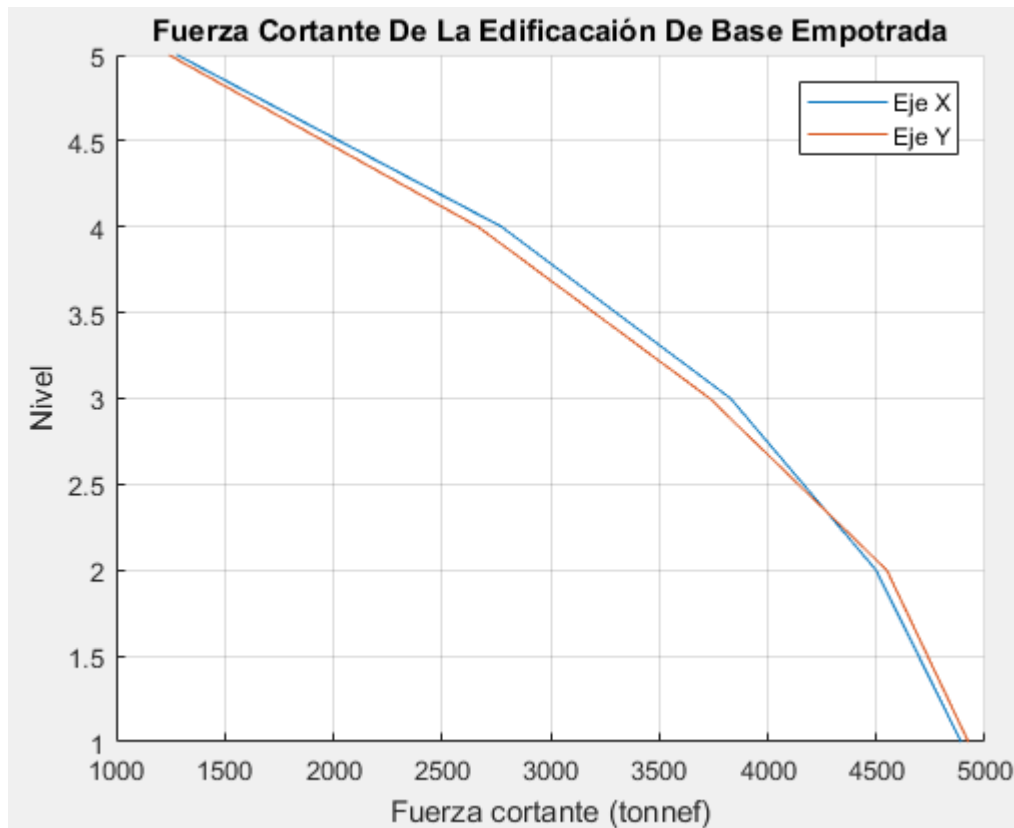


Figura 38 Fuerza Cortante de la edificaci3n de base empotrada
Fuente: propia

8.2. An3lisis Y Dise1o De La Edificaci3n De Base Aislada

8.2.1. An3lisis Por Fuerzas Horizontales Equivalentes

Los par3metros s3smicos usados para una edificaci3n aislados son los mismos que para la edificaci3n convencional tan solo con un cambio en el factor de uso que se considera igual al valor de la unidad.

Periodo objetivo:

$$T_M = 2.75s$$

Factor de amplificaci3n s3smica:

$$C = 2.5 \cdot \frac{T_p \cdot T_l}{T_M^2} = 2.5 \cdot \frac{0.40 \cdot 2.50}{2.75^2} = 0.331$$

Parámetro de aceleración espectral:

$$S_M = 1.5 \cdot Z \cdot C \cdot S = 1.5 \cdot 0.45 \cdot 0.331 \cdot 1 = 0.223$$

Amortiguamiento efectivo:

$$\beta_M = 20\%$$

Coeficiente de amortiguamiento:

$$B_M = \frac{2.31 - 0.41 \cdot \ln(5)}{2.31 - 0.41 \ln(\beta_M)} = 1.525$$

Calculo del desplazamiento:

$$D_M = \frac{g \cdot S_M \cdot T_M^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot B_M} = \frac{9.81 \cdot 0.223 \cdot 2.75^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot 1.525} = 0.275$$

Desplazamiento total:

$$D_{TM} = D_M \cdot \left(1 + y \cdot \frac{12 \cdot e}{b^2 + d^2}\right)$$

$$D_{TM} = 0.275 \cdot \left(1 + 18 \cdot \frac{12 \cdot 1.80}{25^2 + 36^2}\right) = 0.331$$

Resumen de los parámetros bilineales del aislador LRB, se consideran los límites mínimos, nominales y máximos:

Tabla 13
Resumen de parámetros bilineales del aislador LRB

RESUMEN DE PARÁMETROS BILINEALES DEL AISLADOR LRB			
DESCRIPCIÓN	INFERIOR	NOMINAL	SUPERIOR
Rigidez elastica K1 (tonnef/m)	513.90	642.238	835.088
Rigidez post-elastica K2 (tonnef/m)	51.39	64.224	83.509
Fuerza a cero desplazamiento Q (tonnef)	6.283	7.854	11.781
Fuerza de cedencia Fy (tonnef)	6.981	8.727	13.09
Desplazamiento D _M (m)	0.275	0.275	0.242
Rigidez secante ((tonnef/m))	74.247	92.809	132.162
Amortiguamiento efectivo (%)	18.6	18.60	21.9
Coeficiente de amortiguamiento C ((tonnef s /m)	14.317	21.356	29.984

En el anexo A se puede apreciar el proceso de cálculo para la obtención de los parámetros bilineales del aislador.

A continuación, se muestran el diagrama de histéresis del aislador con núcleo de plomo LRB para las propiedades nominales, límite superior e inferior:

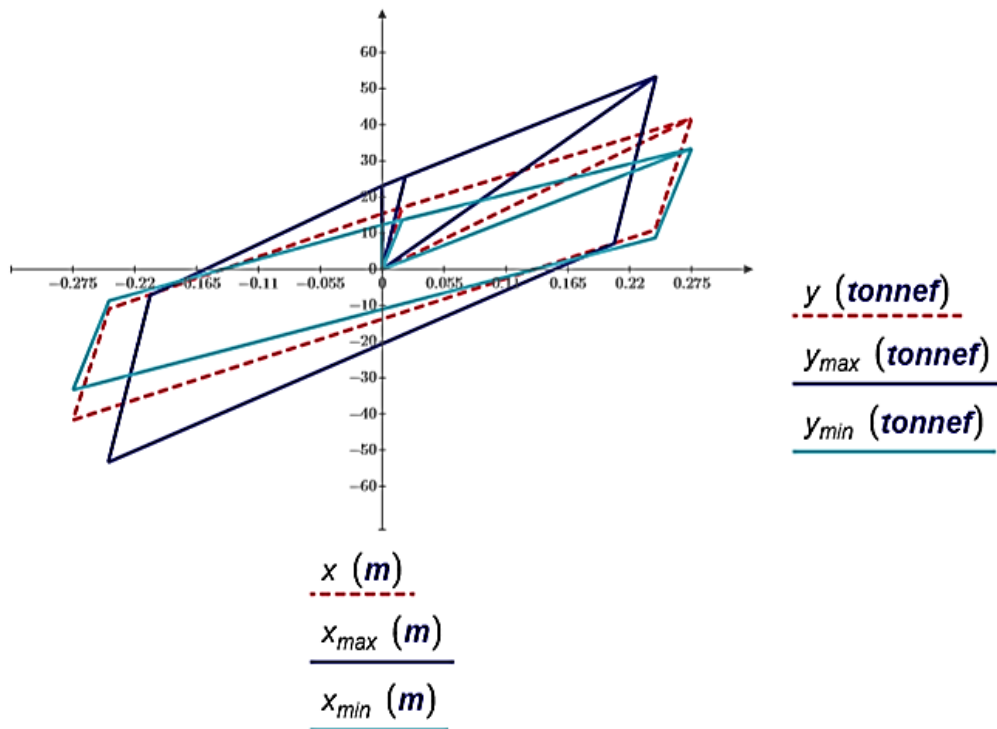


Figura 39 Diagrama de histéresis aislador LRB
Fuente: propia

Calculo de la fuerza sísmica para el sistema de aislación:

$$V_b = K_M \cdot D_M = 1312.076 \text{ tonnef}$$

Calculo de la fuerza sísmica para la superestructura:

$$V_s = \frac{V_b}{R_a} = 656.038 \text{ tonnef}$$

8.3. Análisis Y Diseño De La Edificación Con Aislador Núcleo De Plomo LRB

8.3.1. Análisis Modal

A continuación, se muestran los seis primeros modos de vibración de la estructura con aislador núcleo de plomo LRB:

Tabla 14
Modos de vibración de la estructura con aislador LRB – Límite inferior

Modo	Periodo (S)	Masa participativa en X (%)	Masa participativa en Y (%)	Masa participativa en RZ (%)
1	2.8090	99.71	0.19	0.06
2	2.8060	0.20	99.62	0.15
3	2.6120	0.05	0.16	99.75
4	0.3350	0.04	0.00	0.00
5	0.3240	0.00	0.03	0.00
6	0.2950	0.00	0.00	0.03

Tabla 15
Modos de vibración de la estructura con aislador LRB – Nominal

Modo	Periodo (S)	Masa participativa en X (%)	Masa participativa en Y (%)	Masa participativa en RZ (%)
1	2.5220	99.81	0.07	0.06
2	2.5190	0.07	99.72	0.15
3	2.3450	0.05	0.16	99.74
4	0.3340	0.06	0.00	0.00
5	0.3230	0.00	0.05	0.00
6	0.2940	0.00	0.00	0.05

Tabla 16
Modos de vibración de la estructura con aislador LRB – Límite superior

Modo	Periodo (S)	Masa participativa en X (%)	Masa participativa en Y (%)	Masa participativa en RZ (%)
1	2.1320	99.82	0.00	0.05
2	2.1290	0.01	99.74	0.15
3	1.9810	0.05	0.15	99.70
4	0.3320	0.11	0.00	0.00
5	0.3210	0.00	0.10	0.00
6	0.2930	0.00	0.00	0.09

De las tablas anteriores apreciamos que los 2 primeros modos de vibración son traslacionales y el tercer modo es rotacional, lo que nos indica que la estructura tiene un adecuado pre dimensionamiento, además la masa participativa en el eje “X” e “Y” son mayores al 90%, también se observa que logramos el objetivo de

trasladar el periodo corto de la estructura de base empotra a un periodo largo, lo que significa una reducción de la demanda sísmica.

8.3.2. Análisis Tiempo Historia No Lineal

8.3.2.1. Desplazamientos Y Derivas

Los aisladores incrementan la flexibilidad de la estructura de la estructura, esta flexibilidad reduce la demanda sísmica y por ende se reducen los desplazamientos de la superestructura. El desplazamiento de la estructura se centra en el nivel de aislamiento y la superestructura se mueve como un cuerpo rígido. Estos resultados hacen que se presenten derivas de entrepiso menores en estructuras con aislamiento sísmico.

A continuación, se muestran los desplazamientos promedios para las propiedades nominales, máximas y mínimas:

Tabla 17
Desplazamientos de la edificación con aislador LRB

DESPLAZAMIENTOS						
NIVEL	INFERIOR		NOMINAL		SUPERIOR	
	X-X (m)	Y-Y (m)	X-X (m)	Y-Y (m)	X-X (m)	Y-Y (m)
5	0.19370	0.19347	0.16785	0.16731	0.14269	0.14193
4	0.19260	0.19232	0.16688	0.16634	0.14062	0.14007
3	0.19084	0.19049	0.16518	0.16476	0.13764	0.13723
2	0.18885	0.18857	0.16317	0.16295	0.13458	0.13435
1	0.18634	0.18622	0.16046	0.16044	0.13085	0.13083
0	0.18336	0.18340	0.15708	0.15724	0.12640	0.12653

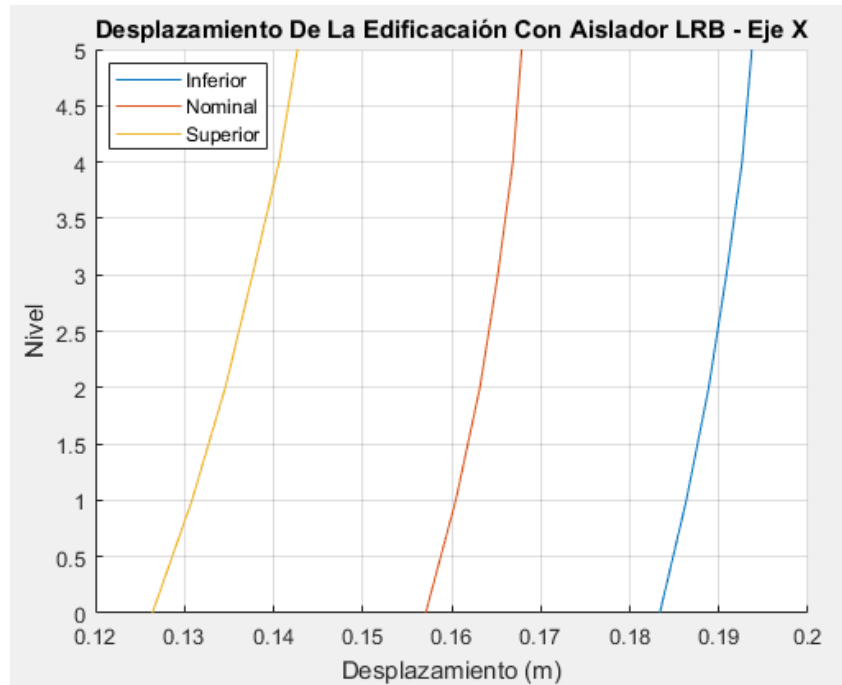


Figura 40 Desplazamiento de la edificaci3n con aislador LRB – Eje X
Fuente: propia

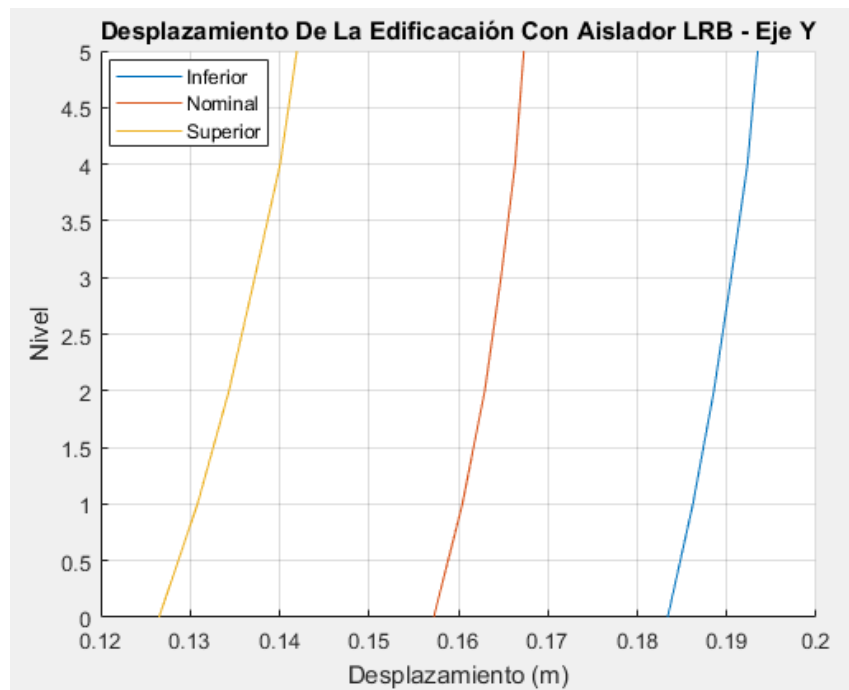


Figura 41 Desplazamiento de la edificaci3n con aislador LRB – Eje Y
Fuente: propia

La deriva de entrepiso es un indicador de daño estructural ante solicitaciones sísmicas. En edificaciones aisladas, el límite máximo de las derivas es más estricto que en las que están empotradas en su base, pues el objetivo de los sistemas de protección es, precisamente, reducir los daños.

El proyecto de norma de Aislamiento Sísmico E.031 establece que la deriva máxima de entrepiso debe ser menor o igual a 0.5%, a continuación, se muestran las derivas promedio de entrepiso para las propiedades nominales, máximas y mínimas:

Tabla 18
Derivas de la edificación con aislador LRB

DERIVAS						
NIVEL	INFERIOR		NOMINAL		SUPERIOR	
	X-X	Y-Y	X-X	Y-Y	X-X	Y-Y
5	0.00028	0.00030	0.00025	0.00025	0.00054	0.00048
4	0.00046	0.00048	0.00044	0.00041	0.00077	0.00074
3	0.00051	0.00050	0.00052	0.00047	0.00079	0.00075
2	0.00065	0.00061	0.00070	0.00065	0.00097	0.00091
1	0.00072	0.00068	0.00082	0.00077	0.00107	0.00104

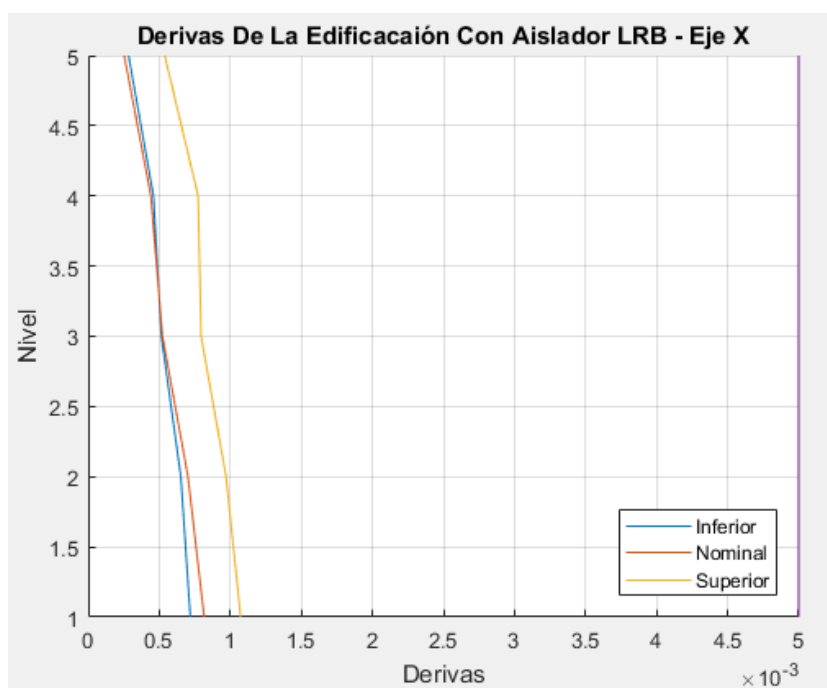


Figura 42 Derivas de la edificación con aislador LRB – Eje X
Fuente: propia

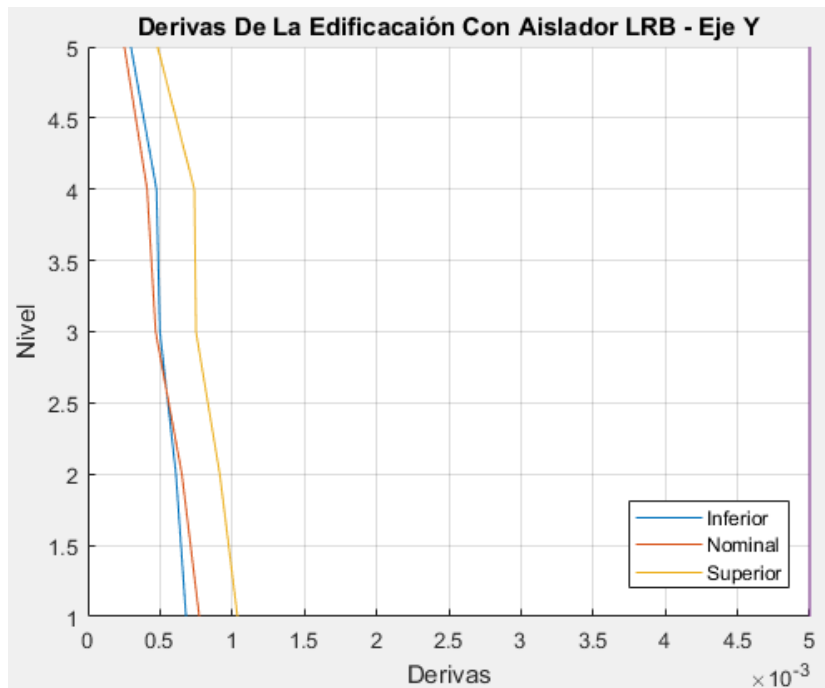


Figura 43 Derivas de la edificación con aislador LRB – Eje Y
Fuente: propia

De las tablas anteriores apreciamos que las derivas obtenidas son menores que la deriva límite 0.5%.

8.3.2.2. ***Aceleraciones Absolutas***

El aislamiento sísmico no solo mejora el comportamiento estructural sino también el del contenido sensible a aceleraciones, la aceleración máxima de entrepiso no debe exceder 0.3g según las recomendaciones de HAZUS, a continuación, se muestran las aceleraciones absolutas en cada piso para las propiedades nominales, máximas y mínimas:

Tabla 19
Aceleración absoluta de la edificación con aislador LRB

ACELERACION ABSOLUTA						
NIVEL	LIMITE INFERIOR		NOMINAL		LIMITE SUPERIOR	
	X-X (g)	Y-Y (g)	X-X (g)	Y-Y (g)	X-X (g)	Y-Y (g)
5	0.24	0.24	0.29	0.29	0.41	0.42
4	0.17	0.17	0.20	0.20	0.28	0.28
3	0.13	0.13	0.15	0.16	0.21	0.21
2	0.13	0.13	0.15	0.15	0.20	0.20
1	0.14	0.14	0.17	0.17	0.23	0.23
0	0.18	0.18	0.22	0.22	0.29	0.30

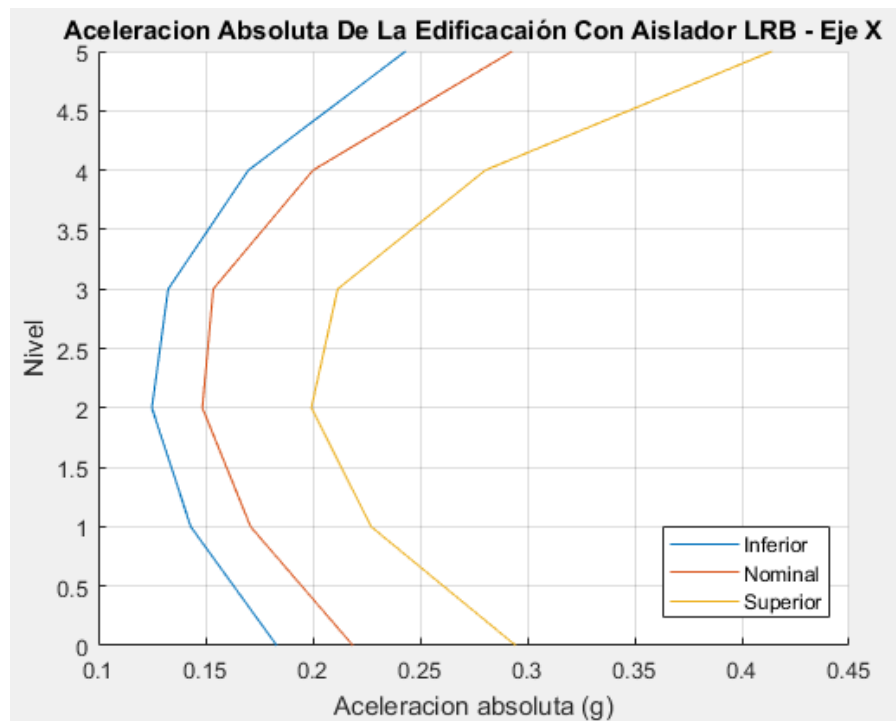


Figura 44 Aceleración absoluta de la edificación con aislador LRB – Eje X
Fuente: propia

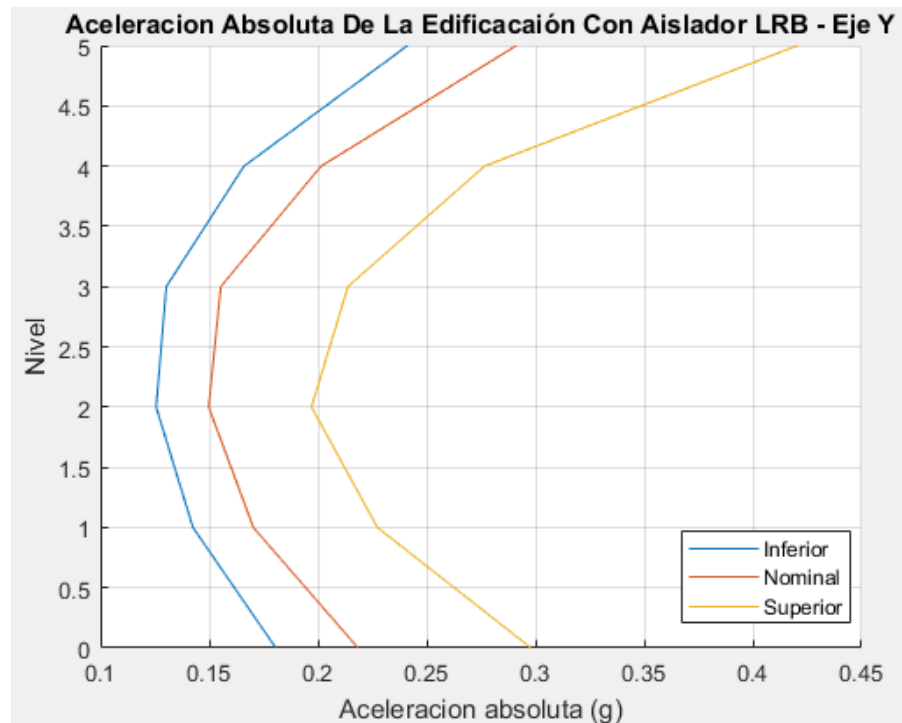


Figura 45 Aceleración absoluta de la edificación con aislador LRB – Eje Y
Fuente: propia

De las tablas anteriores podemos apreciar que la aceleración en los entrepisos es menor que 0.3g, teniendo una aceleración máxima de 0.28g; pero la aceleración máxima en el techo es de 0.42g, teniendo en cuenta que el techo no alberga elementos susceptibles de ser dañados por la aceleración podemos decir que es aceptable.

8.3.2.3. Fuerzas Cortantes

A continuación, se muestran las fuerzas cortantes en cada piso considerando las propiedades nominales, máximas y mínimas:

Tabla 20
Fuerza cortante de la edificación con aislador LRB

FUERZA CORTANTE						
NIVEL	LIMITE INFERIOR		NOMINAL		LIMITE SUPERIOR	
	X-X (Tn)	Y-Y (Tn)	X-X (Tn)	Y-Y (Tn)	X-X (Tn)	Y-Y (Tn)
5	142.01	139.73	171.68	168.93	241.99	244.48
4	290.06	292.38	355.87	357.15	496.77	497.43
3	387.23	385.40	462.60	468.58	641.42	630.75
2	466.16	460.06	533.00	532.18	730.64	721.23
1	510.97	512.03	603.46	597.94	787.79	785.22

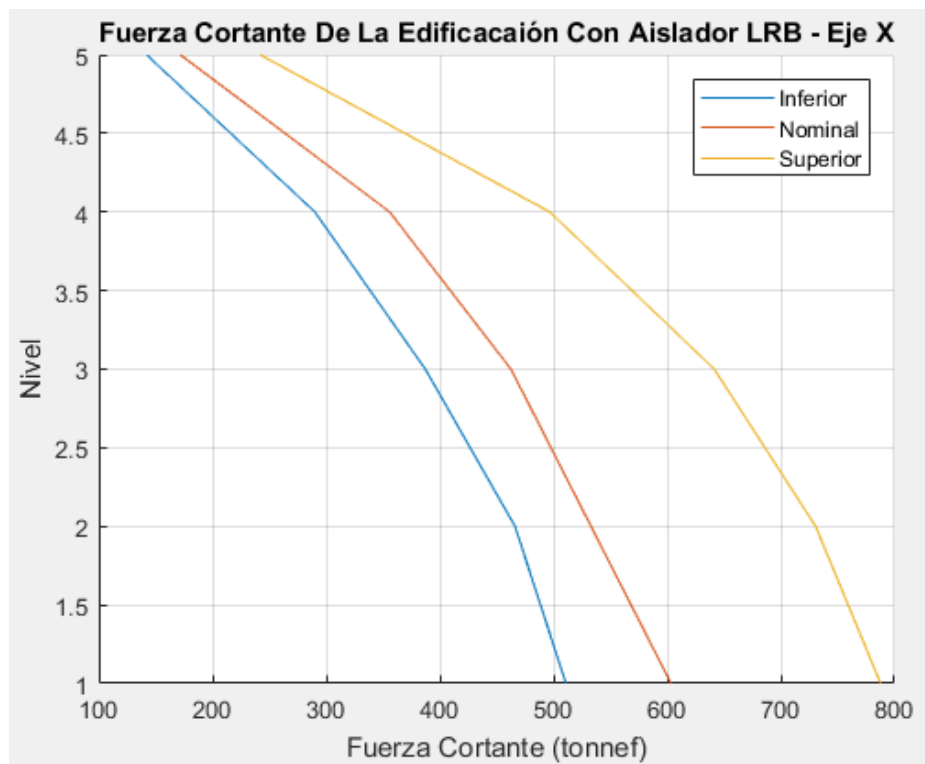


Figura 46 Fuerza cortante de la edificación con aislador LRB – Eje X
Fuente: propia

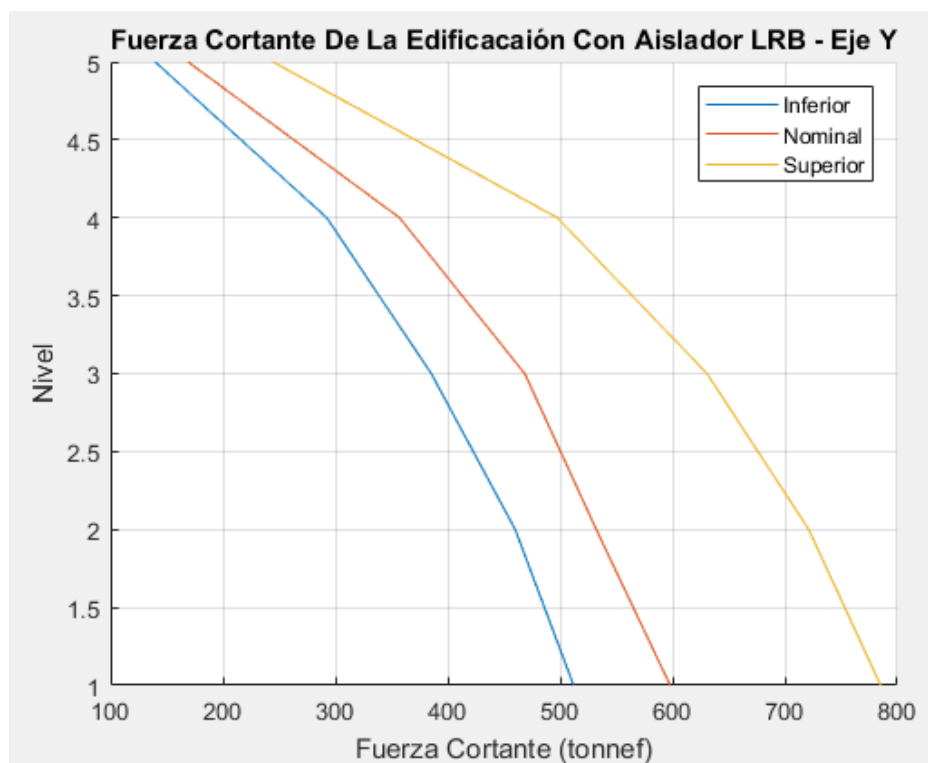


Figura 47 Fuerza cortante de la edificación con aislador LRB – Eje Y
Fuente: propia

8.4. Comparación Del Comportamiento De La Edificación De Base Empotrada VS La Edificación Con Aislador De Núcleo De Plomo LRB

8.4.1. Modos De Vibración

A continuación, se muestra los modos de vibración de la estructura con base empotrada y la estructura aislada:

Tabla 21
Comparación de los modos de vibración

MODO	BASE EMPORTRADA	ESTRUCTURA AISLADA		
		INFERIOR	NOMINAL	SUPERIOR
1	0.553	2.8090	2.5220	2.1320
2	0.534	2.8060	2.5190	2.1290
3	0.493	2.6120	2.3450	1.9810
4	0.197	0.3350	0.3340	0.3320
5	0.189	0.3240	0.3230	0.3210
6	0.175	0.2950	0.2940	0.2930

De la tabla anterior podemos apreciar que se logra el objetivo de trasladar el periodo corto de la estructura con base empotrada a un periodo largo, esto se debe a que los aisladores proporcionan flexibilidad a la estructura y esto significa una reducción de la demanda sísmica.

8.4.2. Desplazamientos Y Derivas

En las siguientes figuras se muestra los desplazamientos promedios a nivel de cada piso en ambas direcciones respecto de la fundación:

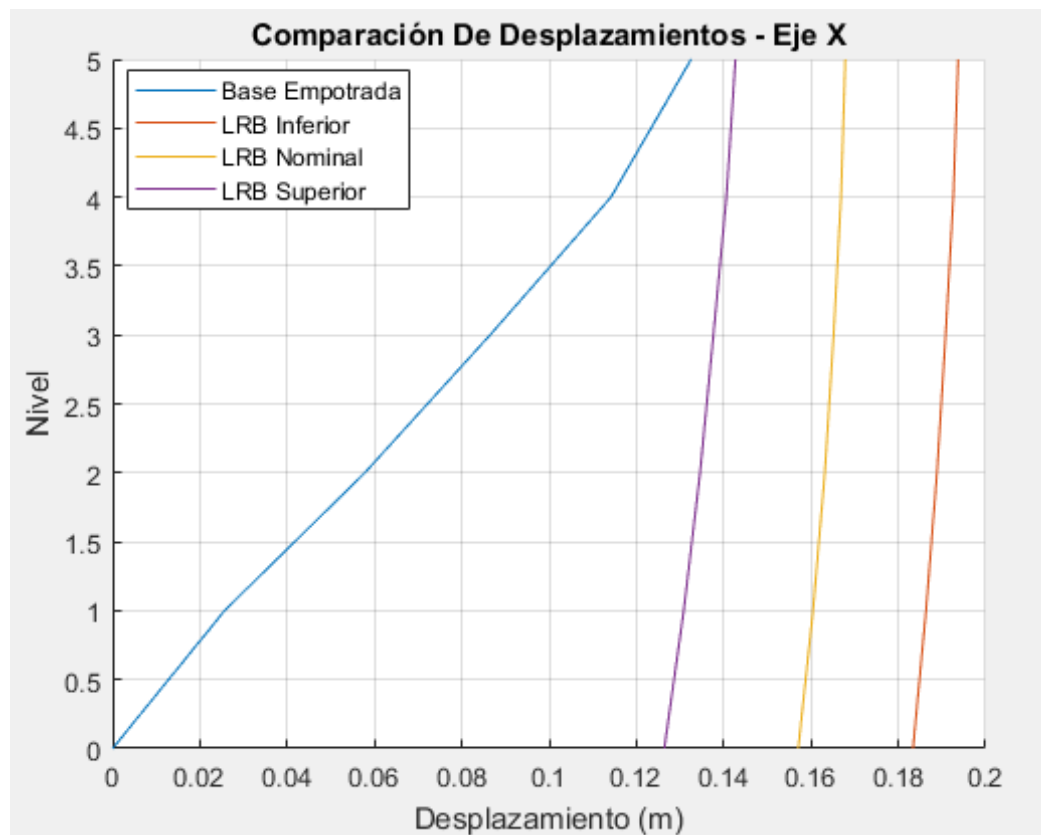


Figura 48 Comparación de desplazamientos de la edificación de base empotrada vs la edificación con aislador LRB – Eje X
Fuente: propia

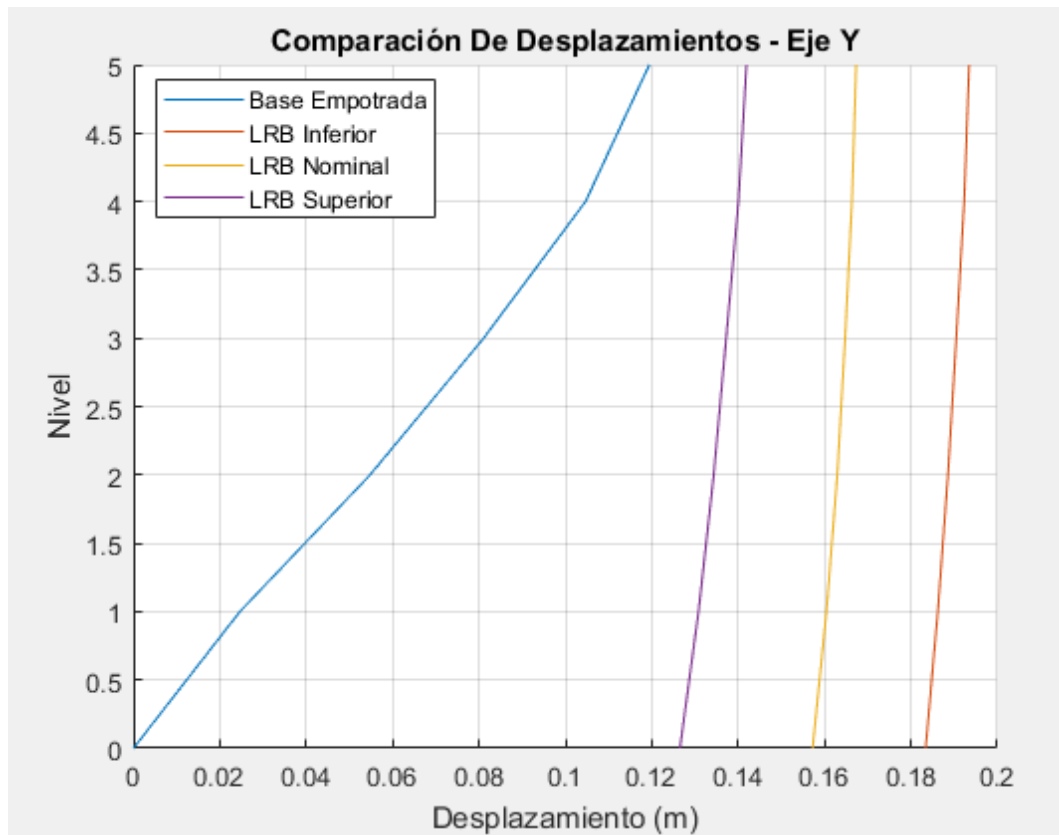


Figura 49 Comparación de desplazamientos de la edificación de base empotrada vs la edificación con aislador LRB – Eje Y
Fuente: propia

De las figuras anteriores, en el caso de la estructura aislada se puede apreciar que el mayor desplazamiento se da en el sistema de aislación, esto debido a la flexibilidad que proporcionan los aisladores, además se nota que los pisos superiores tienen distorsiones casi similares, lo que significa que la estructura aislada se desplaza como un bloque rígido.

En el caso de la edificación de base empotrada se aprecia que no se da el mismo nivel de desplazamiento en la base con respecto al suelo que la estructura aislada, además se aprecia que a mayor altura aumenta el desplazamiento, lo que es un comportamiento común de estructuras convencionales, la diferencia de los desplazamientos de entrepisos es la que permite disipar energía en estas estructuras, lo cual en el caso de la edificación aislada se da en el sistema de aislación debido al gran desplazamiento que se da en la interfaz de aislación.

8.4.3. Derivas

En las siguientes figuras se muestra derivas promedio:

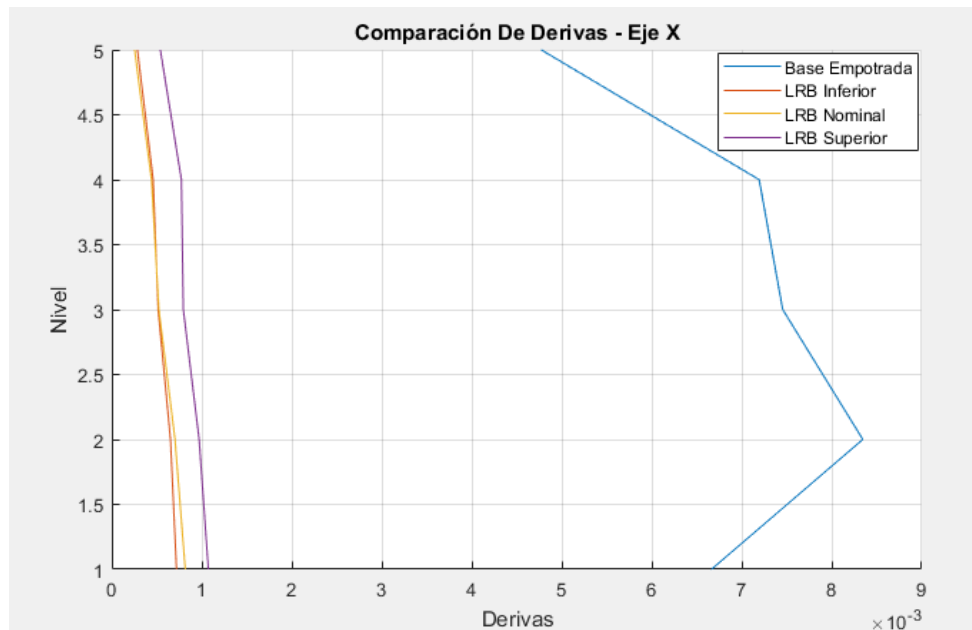


Figura 50 Comparación de derivas de la edificación de base empotrada vs la edificación con aislador LRB – Eje X
Fuente: propia

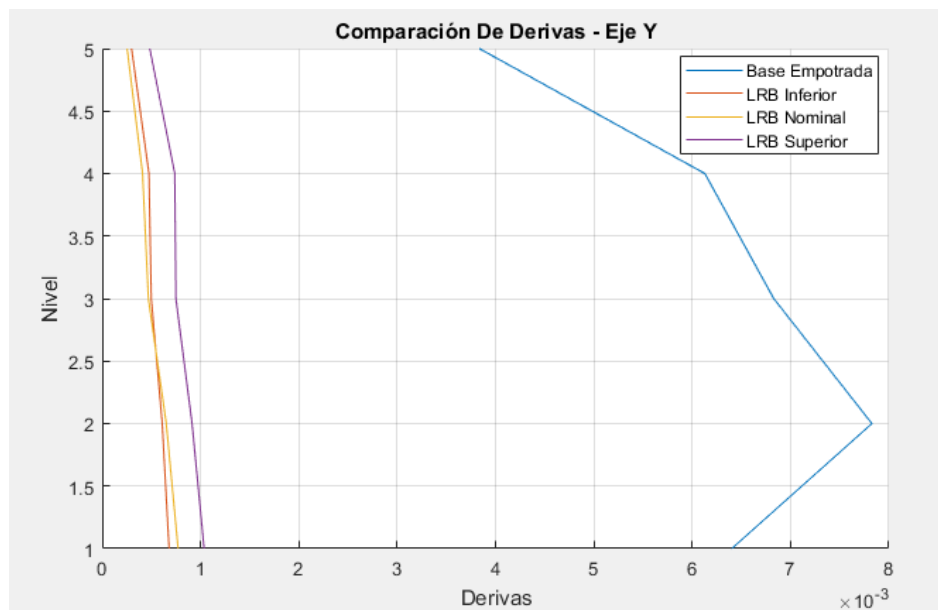


Figura 51 Comparación de derivas de la edificación de base empotrada vs la edificación con aislador LRB – Eje Y
Fuente: propia

De las figuras anteriores se aprecia notablemente la reducción de derivas al implementar en la estructura aisladores sísmicos, la cual nos indica la eficiencia del aislamiento de base, en el siguiente cuadro se muestra el porcentaje de variación de las derivas de la estructura de base empotrada con respecto a la estructura aislada:

Tabla 22
Porcentaje de reducción de las derivas

PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE DERIVAS						
NIVEL	INFERIOR		NOMINAL		SUPERIOR	
	X-X	Y-Y	X-X	Y-Y	X-X	Y-Y
5	94.04	92.59	94.69	93.39	88.71	87.40
4	93.62	92.51	93.87	93.30	89.25	87.96
3	93.10	92.46	92.99	93.12	89.34	89.03
2	92.19	91.67	91.59	91.68	88.37	88.32
1	89.22	88.78	87.76	87.94	83.90	83.81

8.4.4. Aceleraciones Absolutas

En las siguientes figuras se muestra la aceleración absoluta promedio:

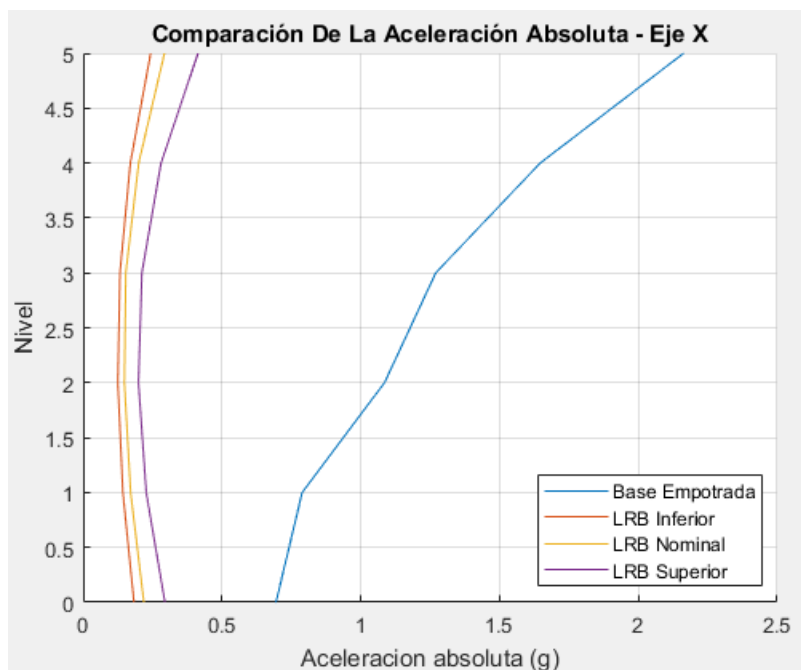


Figura 52 Comparación de la aceleración absoluta de la edificación de base empotrada vs la edificación con aislador LRB – Eje X

Fuente: propia

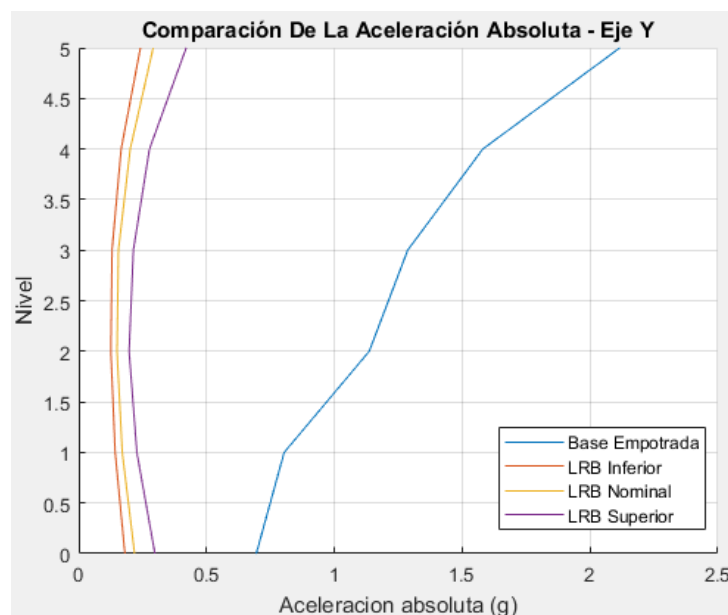


Figura 53 Comparación de la aceleración absoluta de la edificación de base empotrada vs la edificación con aislador LRB – Eje Y
Fuente: propia

De las figuras anteriores se aprecia notablemente la reducción de las aceleraciones al implementar en la estructura aisladores sísmicos la cual nos indica la eficiencia del aislamiento de base; en la estructura de base aislada se nota que las aceleraciones se amplifican levemente en altura, caso contrario ocurre en la estructura de base empotrada las aceleraciones tienen una mayor amplificación en altura, en el siguiente cuadro se muestra el porcentaje de variación de la aceleración de la estructura de base empotrada con respecto a la estructura aislada:

Tabla 23
Porcentaje de reducción de la aceleración absoluta

PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE LA ACELERACION ABSOLUTA						
NIVEL	LIMITE INFERIOR		NOMINAL		LIMITE SUPERIOR	
	X-X (g)	Y-Y (g)	X-X (g)	Y-Y (g)	X-X (g)	Y-Y (g)
5	88.75	88.60	86.46	86.24	80.86	80.13
4	89.67	89.50	87.84	87.25	82.96	82.50
3	89.56	89.88	87.90	87.93	83.34	83.39
2	88.48	88.94	86.32	86.82	81.64	82.66
1	81.86	82.26	78.32	78.81	71.20	71.71
0	73.62	73.99	68.51	68.55	57.58	57.10

El hecho de reducir de manera importante las aceleraciones absolutas se traduce en una reducción de los daños de la estructura misma y principalmente de los equipos y contenidos.

8.4.5. Fuerza Cortante

Otro parámetro para medir la eficiencia del sistema de aislación es la fuerza cortante basal y su distribución en altura, debido a que representa el nivel de esfuerzos al que está sometido la estructura, en las siguientes figuras se muestran la fuerza cortante:

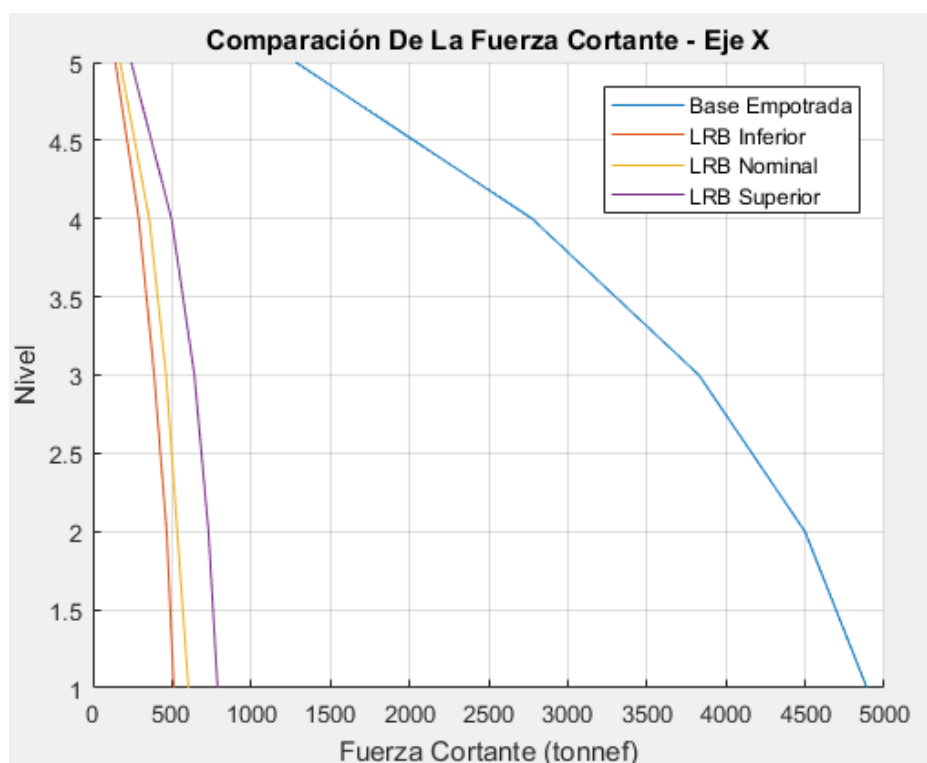


Figura 54 Comparación de la fuerza cortante de la edificación de base empotrada vs la edificación con aislador LRB – Eje X

Fuente: propia

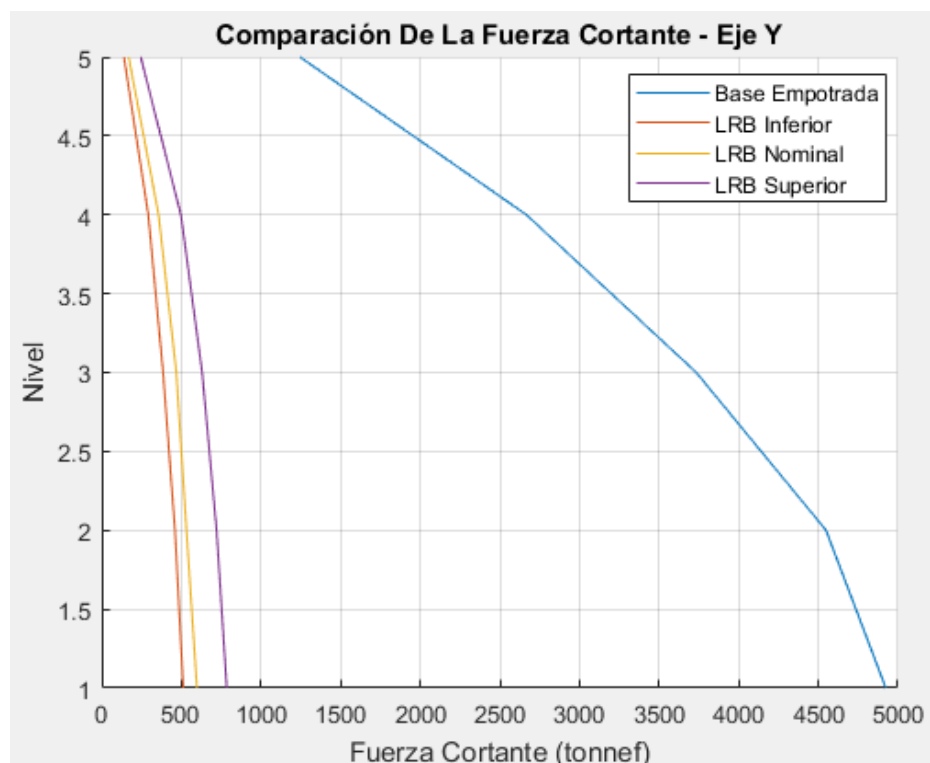


Figura 55 Comparación de la fuerza cortante de la edificación de base empotrada vs la edificación con aislador LRB – Eje Y
Fuente: propia

De las figuras anteriores se aprecia notablemente la reducción de la fuerza cortante al implementar en la estructura aisladores sísmicos la cual nos indica la eficiencia del aislamiento de base, además al tener menor corte basal los elementos estructurales estarán sometidos a menores esfuerzos y se mantendrán en el rango elástico, en el siguiente cuadro se muestra el porcentaje de variación de la fuerza cortante de la estructura de base empotrada con respecto a la estructura aislada:

Tabla 24
Porcentaje de reducción de la fuerza cortante

PORCENTAJE DE REDUCCIÓN DE LA FUERZA CORTANTE						
NIVEL	LIMITE INFERIOR		NOMINAL		LIMITE SUPERIOR	
	X-X (Tn)	Y-Y (Tn)	X-X (Tn)	Y-Y (Tn)	X-X (Tn)	Y-Y (Tn)
5	88.92	86.17	86.61	83.89	81.12	77.99
4	89.55	85.55	87.17	83.22	82.10	78.16
3	89.89	87.44	87.92	85.27	83.25	81.03
2	89.64	90.87	88.15	89.27	83.76	85.07
1	89.55	90.21	87.66	88.46	83.89	84.63

8.5. Comparación De Costos De La Edificación De Base Empotrada VS La Edificación Con Aislador De Núcleo De Plomo LRB

En esta parte de la tesis se evalúa solamente el costo de los elementos que aportan rigidez horizontal, en el siguiente cuadro se aprecia el costo de la edificación de base empotrada:

Tabla 25
Costo de la estructura convencional

COSTO DE LA ESTRUCTURA DE BASE EMPOTRADA					
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO	SUB TOTAL
1	CONCRETO EN COLUMNAS	M3	351.72	382.08	134384.60
2	ACERO EN COLUMNAS	KG	47262.89	4.04	190942.09
3	CONCRETO EN VIGAS	M3	378.84	292.87	110951.75
4	ACERO EN VIGAS	KG	59820.66	4.04	241675.47
TOTAL					677953.91
COSTO POR M2: S/. 155.85					
COSTO POR M2: \$. 46.8					

En el siguiente cuadro se aprecia el costo de la edificación con aislamiento sísmico, el costo del aislador incluye: prototipos, ensayos de laboratorio, entrega de aisladores en obra e instalación.

Tabla 26
Costo de la estructura de base aislada

COSTO DE LA ESTRUCTURA CON AISLAMIENTO SISMICO					
ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO	SUB TOTAL
1	CONCRETO EN COLUMNAS	M3	351.72	382.08	134384.60
2	ACERO EN COLUMNAS	KG	42699.47	4.04	172505.86
3	CONCRETO EN VIGAS	M3	378.84	292.87	110951.75
4	ACERO EN VIGAS	KG	48258.10	4.04	194962.72
5	AISLADORES SISMICOS	UND	41.00	26400.00	1082400.00
TOTAL					1695204.94
COSTO POR M2 CON AISLADORES: S/. 248.83					
COSTO POR M2 CON AISLADORES: \$. 74.72					

De las tablas anteriores apreciamos que el costo de la estructura de base aislada se incrementó en 59.66% respecto del costo de la estructura convencional.

La estructura de base aislada no debe ser evaluado económicamente a corto plazo, sino a largo plazo; las estructuras de base empotrada disipan energía mediante los desplazamientos relativos de los entrepisos incursionando en el rango

inelástico, al darse esto la estructura queda con deformaciones permanentes en los elementos estructurales y no estructurales, y la reparación puede ser parcial o total, por otro lado el contenido de la estructura también serán dañados debido a las altas aceleraciones y en hospitales y/o clínicas se tiene equipos y/o mobiliarios muy costosos, además debe tomarse en cuenta las pérdidas por el no funcionamiento de la edificación; lo que nos ofrece el aislamiento de base es reducción de derivas, aceleraciones y fuerzas cortante, la estructura estará sometida a menores demandas sísmicas, y la disipación de la energía se da en el sistema de aislamiento, y la reparación de este es más económica y más rápido, debido a la reducción de aceleraciones en los entrepisos el contenido y/o equipos susceptibles a la aceleraciones no serán dañados, por tal motivo al analizar la factibilidad económica de la estructura de base aislada debe ser a largo plazo.

9. Conclusiones

Del análisis realizado se logró cumplir con los requisitos de rigidez y resistencia para un sismo de 2500 años usando un sistema aporticado y aisladores LRB, es decir cumple con los requisitos de desempeño de funcionalidad continua.

En el presente trabajo se utilizó el método estático para pre dimensionar el sistema de aislamiento y obtener las fuerzas mínimas para el diseño de la estructura.

El periodo de vibración de la estructura aislada se incrementa debido a la flexibilidad proporcionada por el sistema de aislación, esto reduce la demanda sísmica en la estructura.

En la estructura aislada el mayor desplazamiento se da en la interfaz de aislamiento, esto debido a que el sistema de aislamiento proporciona flexibilidad a la estructura.

El desplazamiento de la estructura aislada a lo largo de altura es casi uniforme, es decir la estructura aislada se mueve como bloque rígido, caso contrario ocurre con la estructura de base empotrada los desplazamientos se incrementan a mayor altura.

En la estructura aislada hay una reducción importante de la deriva con respecto a la estructura de base empotrada, cabe resaltar que las estructuras sin aislamiento disipan energía mediante las distorsiones de entrepiso, y las estructuras con aisladores disipan energía en la base debido a la gran deformación que se dan en la interfaz de aislamiento.

Las aceleraciones de entrepiso en la estructura aislada se reducen notablemente con respecto de la estructura de base empotrada, obteniendo aceleración de piso menores a 0.30g, por lo tanto, los contenidos sensibles a aceleraciones prácticamente no experimentarían daño, en la azotea se tiene una aceleración de

0.42g lo cual supera el límite permisible, pero sabiendo que en la azotea no se alberga ningún contenido que sea susceptible a la aceleración es aceptable.

Con respecto a la fuerza cortante basal obtenida en la estructura aislada también hay una reducción importante con respecto a la estructura de base aislada, eso significa que la estructura aislada estará sometida a menor demanda sísmica.

La estructura con aislamiento sísmico tiene menores desplazamientos, derivas, aceleraciones y fuerza cortante con respecto a la estructura de base empotrada, es notable la eficiencia que tiene los aisladores sísmicos, los cuales garantizan la funcionalidad continua de la estructura.

Con respecto al costo de las estructuras aisladas es mayor en comparación de la estructura convencional.

El diseño de una edificación con aislamiento de base asegura que la estructura tenga un desempeño de funcionalidad continua durante y después de un sismo, y el incremento del costo debido a los aisladores deber ser tomado como un costo a largo plazo (costos de reparación de los elementos estructurales, no estructurales y contenido de la edificación).

10. Bibliografía

- Aguiar , R., Vergara, F., Guaygua, B., & Monge, P. (2014). Análisis Sísmico De Una Estructura Con Aisladores Fps De Primera Y Segunda Generación Y Elastoméricos Con Núcleo De Plomo. *Revista Internacional De Ingeniería De Estructuras* , 19.1, 35-89. Recuperado el 20 de Junio de 2019, de <https://www.researchgate.net/publication/277813054>
- Alex Deybi, R. C. (2018). *Análisis Y Diseño De Una Clínica Haciendo Uso De Aisladores Sísmicos En Su Base*. Tesis Para Optar El Título Profesional De Ingeniero Civil, Universidad Nacional De San Agustín Arequipa, Facultad De Ingeniería Civil, Arequipa. Recuperado el 10 de Enero de 2019, de <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/7184/ICrachad.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Andrés Oviedo, J., & Duque, M. (Diciembre de 2006). Sistemas De Control De Respuesta Sísmica En Edificaciones. *Escuela de Ingeniería de Antioquia*, 6, 105-120. Recuperado el 20 de Enero de 2019, de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5557910.pdf>
- Bridgestone. (Junio de 2015). Seismic Isolation Product Line-up. 1. Recuperado el 8 de Febrero de 2019, de https://www.bridgestone.com/products/diversified/antiseismic_rubber/pdf/catalog_201506.pdf
- Bufo, E., & Tavera, H. (1998). Sismicidad Y Sismotectónica De Perú. *Física De La Tierra*. Recuperado el 15 de Junio de 2019, de <https://revistas.ucm.es/index.php/FITE/article/viewFile/FITE9898110187A/12151>
- Carmona Ramírez, P., & Rosas Fetta, A. J. (2015). *Análisis Comparativo del Comportamiento Sísmico Dinámico del Diseño Normativo Sismo-resistente de un Sistema Dual Frente al Modelo con Aisladores de un Sistema Aporticado del Edificio de Oficinas Schell de 6 pisos ubicado en la Provincia de Lima – Perú*. Tesis Para Optar Por El Título De Ingeniero Civil , UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS, Carrera De Ingeniería Civil, Lima. Recuperado el 24 de Marzo de 2019, de <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/592408>
- Constantinou, M., Kalpakidis, I., Filiatrault, A., & Ecker Lay, R. (2011). *LRFD, Based Analysis And Design Procedures For Bridge Bearings And Seismic Isolators*. Technical Report MCEER-11-0004, University at Buffalo, State University of New York, New York. Recuperado el 10 de Marzo de 2019
- DIS, D. I. (2019). *Dynamic Isolation Systems*. Recuperado el 18 de Mayo de 2019, de Dynamic Isolation Systems: <http://www.dis-inc.com/company.html>
- Farzad, N., & Kelly, J. (1999). *Design Of Seismic Isolated Structures*. New York: John Wiley & Sons, Inc. Recuperado el 13 de Abril de 2019

- Fenz, D., & Constantino, M. (2008). *Mechanical Behavior Of Multi-Spherical Sliding Bearings*. Technical Report MCEER-08-0007, University at Buffalo, The State University of New York. Recuperado el 02 de Abril de 2019
- Genatios, C., & Lafuente, M. (2016). *Introducción Al Uso De Aisladores Y Disipadores En Estructuras*. Ingeniería Sísmica, CAF-Banco de Desarrollo de América Latina, Caracas. Recuperado el 14 de Marzo de 2019, de <http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1213/Uso%20de%20aisladores%20y%20disipadores%20en%20estructuras.pdf>
- Gomez, J., Bernal, I., & Tavera, H. (2010). *Zonificación Sismo-Geotécnica para Siete Distritos de Lima Metropolitana*. Proyecto SIRAD, Instituto Geofísico del Perú, Lima. Recuperado el 18 de Mayo de 2019, de https://www.academia.edu/36823239/INSTITUTO_GEOFISICO_DEL_PERU_ZONIFICACION_SISMICO-GEOTECNICA_PARA_SIETE_DISTritos_DE_LIMA_METROPOLITANA_Comportamiento_Din%C3%A1mico_del_Suelo
- HAZUS. (2003). *Multi-hazard Loss Estimation Methodology*. Recuperado el 18 de Junio de 2019, de www.fema.gov/plan/prevent/hazus
- Kelly, J., & Konstantinidis, D. (2011). *Mechanics Of Rubber Bearings For Seismic And Vibration Isolation*. Jhon Wiley & Sons. Recuperado el 12 de Mayo de 2019
- Korswagen Eguren, P. A., Arias Ricse, J. C., & Huaranga Huamaní, P. G. (2012). *Análisis Y Diseño De Estructuras Con Aisladores Sísmicos En el Perú*. Tesis Para Optar Por El Título De Ingeniero Civil, Pontificia Universidad Católica Del Perú, Facultad De Ciencias E Ingeniería, Lima. Recuperado el 18 de Febrero de 2019, de <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/1631>
- Mendo Rodríguez, A. R. (2015). *Bases Para La Implementación De La Norma Peruana De Análisis Y Diseño De Edificios Con Aislación Sísmica*. Tesis Para Optar El Grado De Magíster En Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Católica Del Perú, Escuela De Posgrado, Lima. Recuperado el 19 de Marzo de 2019, de <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/6817>
- Ministerio De Vivienda, C. Y. (2018). *Proyecto de Norma de Aislamiento Sísmico E.031*. Lima. Recuperado el 20 de Julio de 2019
- Molero, D. V. (2015). *Lineamientos Para El Análisis Y Diseño De Edificaciones Sísmicamente Aisladas En El Perú*. Tesis Para Optar El Grado De Magíster, Pontificia Universidad Católica Del Perú, Escuela De Posgrado, Lima. Recuperado el 15 de Abril de 2019, de <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/6729>
- Morgan, T., & Mahin, S. (2011). *The Use Of Base Isolation Systems To Achieve Complex Seismic Performance Objectives*. PEER Report 2011/06, Pacific Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley, College of Engineering, California. Recuperado el 08 de Junio de 2019, de

https://peer.berkeley.edu/sites/default/files/webpeer-2011-06-troy_a._morgan_and_stephen_a._mahin.pdf

- Palacios, Z. M. (2015). *Analisis Y Diseno De Un Hospital, Con Aisladores Elastomericos En El Peru*. Proyecto De Tesis Para Optar El Grado Académico De Ingeniero Civil, Universidad Nacional De Piura, Facultad De Ingeniería Civil, Piura. Recuperado el 27 de Marzo de 2019, de <http://repositorio.unp.edu.pe/handle/UNP/564>
- PREDES, C. d. (2009). *Diseño de escenario sobre el impacto de un sismo de gran magnitud en Lima Metropolitana y Callao*. Proyecto, Instituto Nacional de Defensa Civil - INDECI, Lima. Recuperado el 14 de Febrero de 2019, de http://www.predes.org.pe/archivos/publicaciones/d_esc_sis_lima.pdf

11. Anexos

Cálculo del Desplazamiento de Diseño y Máximo

a) Definición de los parámetros sísmicos

Zona sísmica:

$Z := 0.45$ Factor de zona (zona 4)

Tipo de suelo:

$S := 1.00$ Factor de suelo (suelo tipo S1)

$T_P := 0.4 \cdot s$ Periodo que define la plataforma del factor "C"

$T_L := 2.5 \cdot s$ Periodo que define el inicio de la zona del factor "C" con desplazamiento constante

Factor de uso:

$U := 1$ Factor de uso para sistema aislado

Periodo objetivo:

$T_M := 2.75 \cdot s$

Aceleración de la gravedad

$$g := 9.81 \cdot \frac{m}{s^2}$$

b) Calculamos el factor de amplificación sísmica

$$C_M := \begin{cases} \text{if } T_M < 0.20 \cdot T_P & = 0.331 \\ \left| 1 + 7.5 \cdot \frac{T_M}{T_P} \right| & \\ \text{else if } 0.2 \cdot T_P \leq T_M \wedge T_M < T_P & \\ 2.5 & \\ \text{else if } T_P \leq T_M \wedge T_M < T_L & \\ \left| 2.5 \cdot \frac{T_P}{T_M} \right| & \\ \text{else if } T_L \leq T_M & \\ \left| 2.5 \cdot \frac{T_P \cdot T_L}{T_M^2} \right| & \end{cases}$$

c) Cálculo del parámetro de aceleración espectral

$$S_M := 1.5 \cdot Z \cdot C_M \cdot S = 0.223$$

d) Definimos el amortiguamiento efectivo

$$\beta_M := 20\%$$

e) Coeficiente de amortiguamiento

$$B_M := \frac{2.31 - 0.41 \cdot \ln(5)}{2.31 - 0.41 \cdot \ln\left(\frac{\beta_M}{1\%}\right)} = 1.525$$

f) Cálculo del desplazamiento

$$D_M := \frac{g \cdot S_M \cdot T_M^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot B_M} = 0.275 \text{ m}$$

g) Cálculo del desplazamiento total

$$b := 25 \text{ m} \quad \text{Dimensión mas corta}$$

$$d := 36 \text{ m} \quad \text{Dimensión mas larga}$$

$$e := 0.05 \cdot d = 1.8 \text{ m} \quad \text{Excentricidad}$$

$$y := 18 \text{ m} \quad \text{Dist. entre el CR del sist. de aislamiento y el aislador en interes}$$

$$D_{TM} := D_M \cdot \left(1 + y \cdot \frac{12 \cdot e}{b^2 + d^2}\right) = 0.331 \text{ m} \quad \text{Desplazamiento total para el sismo máximo considerado}$$

Cálculo de los Parámetros Bilineales del Aislador Elastomérico con Núcleo de Plomo

1) Datos:

$W := 5770 \text{ tonnef}$	peso sísmico de la estructura (D+%L)
$P_{max} := 268 \cdot \text{tonnef}$	carga máxima en el aislador
$P_{min} := 151 \text{ tonnef}$	carga mínima en el aislador
$N := 41$	cantidad de aisladores
$\gamma_s := 1.5$	deformación de corte directa máxima
$\gamma_{max} := 2.5$	deformación de corte admisible
$t_r := 4.4 \text{ mm}$	espesor de capa de goma
$t_s := 3.1 \text{ mm}$	espesor de laminas de acero
$t_{pl} := 3.2 \text{ cm}$	espesor de laminas de acero sup e inf
$D_i := 100 \text{ mm}$	diámetro inicial del núcleo de plomo
$G := 0.385 \cdot \frac{N}{\text{mm}^2}$	módulo de corte
$H_r := 198 \cdot \text{mm}$	espesor total del cuacho
$n := 45$	número de capas de caucho
$K := 200000 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}^2}$	módulo de compresibilidad de la goma
$\sigma_{AC} := 90 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$	tensión admisible de compresión
$\sigma_y := 2400 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$	esfuerzo de cedencia de la placa del acero

$$\lambda := 0.10$$

coef. para el cálculo de la deformación elástica
varía entre 0.05-0.1

$$E_o := 35 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$$

factor de fabricante

$$\tau_y := 1000 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}^2}$$

esfuerzo de fluencia del plomo

$$k_y := 0.70$$

valor entre 0.7-1

$$\varepsilon_b := 5.5$$

factor, usualmente se usa 5.5

$$g := 9.81 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

aceleración de la gravedad

2) Cálculo de la rigidez

$$K_{HTOTAL} := \frac{4 \pi^2 \cdot W}{T_M^2 g} = 3070.444 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

$$K_H := \frac{K_{HTOTAL}}{N} = 74.889 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

3) Área y diámetro del aislador

$$A := \frac{P_{max}}{\sigma_{AC}} = 297777.778 \text{ mm}^2$$

área calculada del aislador

$$D_e := \sqrt{4 \cdot \frac{A}{\pi} + D_i^2} = 623.813 \text{ mm}$$

diámetro calculado del aislador

$$D_e := 650 \text{ mm}$$

diámetro a usar

$$A := \frac{\pi}{4} (D_e^2 - D_i^2) = 323976.742 \text{ mm}^2$$

área del aislador

4) Altura total del aislador

$$h := H_r + (n - 1) \cdot t_s = 0.334 \text{ m}$$

altura de las capa de goma y capas acero

$$H := h + 2 \cdot t_{pl} = 0.398 \text{ m}$$

altura total del aislador

5) Rigidez efectiva

$$K_H := \frac{G \cdot A}{H_r} = 64.238 \frac{\text{tonnef}}{m}$$

6) Energía disipada

$$W_D := 2 \cdot \pi \cdot K_H \cdot D_M^2 \cdot \beta_M = 6.1 \text{ tonnef} \cdot m$$

7) Fuerza a cero desplazamiento

$$Q_I := \frac{W_D}{4 \cdot D_M} = 5.548 \text{ tonnef}$$

8) Rigidez post-fluencia

$$K_2 := K_H - \frac{Q_I}{D_M} = 44.057 \frac{\text{tonnef}}{m}$$

9) Rigidez elástica

$$K_1 := 10 \cdot K_2 = 440.567 \frac{\text{tonnef}}{m}$$

10) Desplazamiento de fluencia

$$D_y := \frac{Q_I}{K_1 - K_2} = 0.01399 \text{ m}$$

11) Fuerza a cero desplazamiento

$$Q_I := \frac{W_D}{4 \cdot (D_M - D_y)} = 5.845 \text{ tonnef}$$

12) Área requerida y diámetro del núcleo de plomo

$$A_p := \frac{Q_I}{T_y} = 58.45 \text{ cm}^2$$

$$D_I := 2 \cdot \sqrt{\frac{A_p}{\pi}} = 8.627 \text{ cm}$$

$$D_r := 100 \text{ mm} \quad \text{diámetro a usar}$$

$$\text{if} \left(D_i \geq \frac{D_e}{6} \wedge D_i \leq \frac{D_e}{3}, \text{"ok"}, \text{"no cumple"} \right) = \text{"no cumple"}$$

$$A_p := \pi \cdot \left(\frac{D_i}{2} \right)^2 = 78.54 \text{ cm}^2$$

área del núcleo de plomo

$$Q_i := A_p \cdot \tau_y = 7.854 \text{ tonnef}$$

fuerza a cero desplazamiento

13) Desplazamiento de fluencia

$$K_2 := \frac{G \cdot \pi \cdot (D_e^2 - D_i^2)}{4 \cdot H_r} = 64.238 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

$$K_H := K_2 + \frac{Q_i}{D_M} = 92.809 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

$$D_y := \frac{Q_i}{9 \cdot K_2} = 0.01358 \text{ m}$$

14) Rigidez elástica

$$K_y := \frac{Q_i}{D_y} + K_2 = 6299.548 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$$

15) Fuerza de fluencia

$$F_y := Q_i + K_2 \cdot D_y = 8.727 \text{ tonnef}$$

16) Energia disipada

$$W_D := 4 \cdot Q_i \cdot (D_M - D_y) = 8.209 \text{ tonnef} \cdot \text{m}$$

17) Factor de forma

$$S_{HDR} := \frac{1}{4 \cdot t_r} (D_e - D_i) = 31.25$$

$$S_{LRB} := \frac{1}{4 \cdot D_e \cdot t_r} (D_e^2 - D_i^2) = 36.058$$

$$\text{if} (\min(S_{HDR}, S_{LRB}) > 10, \text{"ok"}, \text{"no cumple"}) = \text{"ok"}$$

18) Verificación de la tensión admisible

Tensión máxima en las láminas de acero

$$\sigma_s := 1.5 \cdot \frac{t_r}{t_s} \cdot \sigma_{AC} = 1916.129 \frac{\text{tonnef}}{m^2}$$

Esfuerzo admisible del acero

$$\sigma_{adm} := 0.75 \cdot \sigma_y = 18000 \frac{\text{tonnef}}{m^2}$$

$$\text{if}(\sigma_{adm} > \sigma_s, \text{"ok"}, \text{"no cumple"}) = \text{"ok"}$$

19) Cálculo de la rigidez y frecuencia vertical

Módulo de elasticidad del cuacho y acero

$$E_c := \left(\frac{1}{6 \cdot G \cdot S_{HDR}^2} + \frac{4}{3 \cdot K} \right)^{-1} = 90794.715 \frac{\text{tonnef}}{m^2}$$

Módulo de compresión del plomo

$$E_b := 1400000 \frac{\text{tonnef}}{m^2}$$

Rigidez vertical

$$K_v := \frac{E_c \cdot A}{H_r} + \frac{E_b \cdot A_p}{h} = 181444.006 \frac{\text{tonnef}}{m}$$

Frecuencia vertical

$$f_v := \frac{1}{\sqrt{\frac{W}{K_v \cdot g}}} = 17.564 \frac{1}{s}$$

$$\text{if}\left(f_v > 10 \cdot \frac{1}{s}, \text{"ok"}, \text{"no cumple"}\right) = \text{"ok"}$$

20) Verificación de la deformación máxima angular

Deformación de corte

$$\gamma_s := \frac{D_M}{H_r} = 1.388$$

Deformación axial media de la capa de elastómero

$$\epsilon_c := \frac{P_{max}}{E_o \cdot \left(1 + 2 \cdot k_1 \cdot S_{LRB}^2\right)} = 0.0013$$

Deformación por compresión

$$\gamma_c := 6 \cdot S_{LRB} \cdot \epsilon_c = 0.28076$$

Deformación angular máxima

$$\gamma_{max} := \gamma_s + \gamma_c = 1.669$$

Deformación máxima aceptable

$$FS := 1.50$$

$$\gamma_{prop} := \frac{0.85 \cdot \epsilon_b}{FS} = 3.117$$

$$\text{if } (\gamma_{prop} > \gamma_{max}, \text{"ok", "no cumple"}) = \text{"ok"}$$

21) Verificación al pandeo

Área de corte efectiva

$$A_s := (A + A_p) \cdot \frac{h}{H_r} = 0.56 \text{ m}^2$$

Rigidez de corte efectiva

$$P_s := G \cdot A_s = 22.002 \text{ tonnef}$$

Inercia del aislador

$$I := \frac{\pi}{4} \cdot \left(\left(\frac{D_o}{2} \right)^4 - \left(\frac{D_i}{2} \right)^4 \right) = 0.00876 \text{ m}^4$$

Rigidez que se opones a la inclinación

$$EI_{eff} := \frac{1}{3} \cdot E_c \cdot I = 265.045 \text{ tonnef} \cdot \text{m}^2$$

Carga de pandeo del aislador

$$P_E := \frac{\pi^2 \cdot EI_{eff}}{h^2} = 23393.03 \text{ tonnef}$$

Carga crítica

$$P_{crit} := \frac{P_s}{2} \cdot \left(\sqrt{1 + 4 \cdot \frac{P_E}{P_s}} - 1 \right) = 706.501 \text{ tonnef}$$

$$FS := \frac{P_{crit}}{P_{max}} = 2.636$$

if(FS > 2, "ok", "no cumple") = "ok"

22) Verificación al volcamiento

$$D_{max} := \frac{P_{min} \cdot 0.6 \text{ m}}{P_{min} + K_H \cdot H} = 0.482 \text{ m}$$

$$FS := \frac{D_{max}}{D_M} = 1.753$$

if(FS > 1, "ok", "no cumple") = "ok"

23) Caráctersísticas para la modelación bilineal

Rigidez vertical

$$K_v = 181444.006 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

Rigidez efectiva

$$K_{eff} := K_H = 92.809 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}} \quad K_{eff,t} := N \cdot K_{eff} = 3805.157 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

Energía disipada

$$W_D = 8.209 \text{ m} \cdot \text{tonnef}$$

Deformación elastica

$$D_y = 0.0136 \text{ m}$$

Rigidez post-fluencia

$$K_2 = 64.238 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

Rigidez pre-fluencia

$$K_1 = 642.375 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$$

Fuerza de fluencia

$$F_y = 8.727 \text{ tonnef}$$

Periodo y frecuencia circular

$$T_{M,C} := 2 \cdot \pi \sqrt{\frac{W}{g \cdot K_{eff} \cdot N}} = 2.47 \text{ s} \quad \text{periodo}$$

$$w := 2 \cdot \frac{\pi}{T_{M,C}} = 2.544 \frac{1}{\text{s}} \quad \text{frecuencia circular}$$

Amortiguamiento efectivo

$$\beta := \frac{W_D}{2 \cdot \pi \cdot K_{eff} \cdot D_M^2} = 0.186 \quad C := \frac{W_D}{2 \cdot D_M^2 \cdot w} = 21.356 \frac{\text{tonnef} \cdot \text{s}}{\text{m}}$$

Ratio de rigidez de post y pre fluencia

$$r_a := \frac{K_2}{K_1} = 0.1$$

24) Parametros bilineales para el limite inferior y superior

$$\lambda_{max} := 1.3$$

$$\lambda_{max_Q} := 1.5$$

$$K_{2_max} := \lambda_{max} \cdot K_2 = 83.509 \frac{\text{tonnef}}{m}$$

$$K_{1_max} := 10 \cdot K_{2_max} = 835.088 \frac{\text{tonnef}}{m}$$

$$Q_{max} := \lambda_{max_Q} \cdot Q_i = 11.781 \text{ tonnef}$$

$$D_{y_max} := \frac{Q_{max}}{K_{1_max} - K_{2_max}} = 0.016 \text{ m}$$

$$F_{y_max} := Q_{max} + K_{2_max} \cdot D_{y_max} = 13.09 \text{ tonnef}$$

$$W_{D_max} := \lambda_{max} \cdot W_D = 10.672 \text{ tonnef} \cdot m$$

$$D_{M_max} := \frac{W_{D_max}}{4 \cdot Q_{max}} + D_{y_max} = 0.242 \text{ m}$$

$$K_{eff_max} := K_{2_max} + \frac{Q_{max}}{D_{M_max}} = 132.162 \frac{\text{tonnef}}{m}$$

$$T_{M_max} := 2 \cdot \pi \sqrt{\frac{W}{g \cdot K_{eff_max} \cdot N}} = 2.07 \text{ s}$$

$$w_{M_max} := \frac{2 \cdot \pi}{T_{M_max}} = 3.035 \frac{1}{s}$$

$$\beta := \frac{W_{D_max}}{2 \cdot \pi \cdot K_{eff_max} \cdot D_{M_max}^2} = 0.219 \quad C := \frac{W_{D_max}}{2 \cdot D_{M_max}^2 \cdot w_{M_max}} = 29.984 \frac{\text{tonnef} \cdot s}{m}$$

$$K_{eff_tmax} := K_{eff_max} \cdot N = 5418.649 \frac{\text{tonnef}}{m}$$

$$\lambda_{min} := 0.8$$

$$\lambda_{min_Q} := 0.8$$

$$K_{2_min} := \lambda_{min} \cdot K_2 = 51.39 \frac{\text{tonnef}}{m}$$

$$K_{1_min} := 10 \cdot K_{2_min} = 513.9 \frac{\text{tonnef}}{m}$$

$$Q_{min} := \lambda_{min_Q} \cdot Q_i = 6.283 \text{ tonnef}$$

$$D_{y_min} := \frac{Q_{min}}{K_{1_min} - K_{2_min}} = 0.014 \text{ m}$$

$$F_{y_min} := Q_{min} + K_{2_min} \cdot D_{y_min} = 6.981 \text{ tonnef}$$

$$W_{D_min} := \lambda_{min} \cdot W_D = 6.567 \text{ tonnef} \cdot m$$

$$D_{M_min} := \frac{W_{D_min}}{4 \cdot Q_{min}} + D_{y_min} = 0.275 \text{ m}$$

$$K_{eff_min} := K_{2_min} + \frac{Q_{min}}{D_{M_min}} = 74.247 \frac{\text{tonnef}}{m}$$

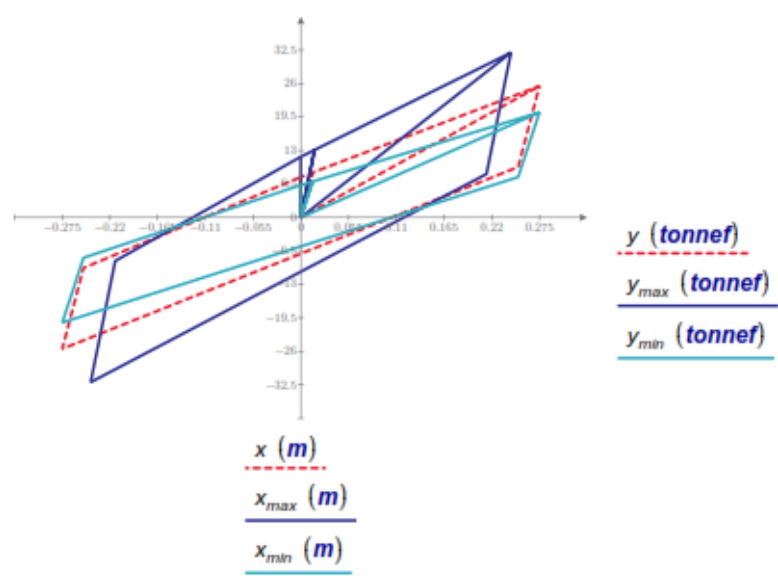
$$T_{M_min} := 2 \cdot \pi \sqrt{\frac{W}{g \cdot K_{eff_min} \cdot N}} = 2.762 \text{ s}$$

$$w_{M_min} := \frac{2 \cdot \pi}{T_{M_max}} = 3.035 \frac{1}{s}$$

$$\beta := \frac{W_{D_min}}{2 \cdot \pi \cdot K_{eff_min} \cdot D_{M_min}^2} = 0.186$$

$$C := \frac{W_{D_min}}{2 \cdot D_{M_min}^2 \cdot w_{M_min}} = 14.317 \frac{\text{tonnef} \cdot s}{m}$$

24) Diagrama de histéresis



Cálculo de las Fuerzas Laterales Mínimas

a) Cálculo de la fuerzas sísmica para el sistema de aislación

$$V_b := K_{eff_tmax} \cdot D_{M_max} = 1312.076 \text{ tonnef}$$

b) Cálculo del factor de reducción para el sistema aislado

$$R_0 := 8 \quad \text{Factor de reducción básico}$$

$$R := 8 \quad \text{Factor de reducción}$$

$$R_a := \text{if } 1 < \frac{3}{8} \cdot R_0 \wedge \frac{3}{8} \cdot R_0 < 2 \mid = 2$$

$$\left\| \begin{array}{l} \frac{3}{8} \cdot R_0 \\ \text{else if } \frac{3}{8} \cdot R_0 \leq 1 \\ \left\| 1 \\ \text{else if } 2 \leq \frac{3}{8} \cdot R_0 \\ \left\| 2 \end{array} \right. \right.$$

c) Cálculo de la fuerzas sísmica para la superestructura

$$V_s := \frac{K_{eff_tmax} \cdot D_{M_max}}{R_a} = 656.038 \text{ tonnef}$$

d) Límites del cortante

$$T_a := T_{M_max} = 2.07 \text{ s}$$

$$C := \text{if } T_a < 0.20 \cdot T_P \mid = 0.483$$

$$\left\| \begin{array}{l} 1 + 7.5 \cdot \frac{T_a}{T_P} \\ \text{else if } 0.2 \cdot T_P \leq T_a \wedge T_a < T_P \\ \left\| 2.5 \\ \text{else if } T_P \leq T_a \wedge T_a < T_L \\ \left\| 2.5 \cdot \frac{T_P}{T_a} \\ \text{else if } T_L \leq T_a \\ \left\| 2.5 \cdot \frac{T_P \cdot T_L}{T_a^2} \end{array} \right. \right.$$

Factor de amplificación sísmica

$$CR := \text{if} \left(\frac{C}{R_a} \geq 0.11, \frac{C}{R_a}, 0.11 \right) = 0.242$$

$$V_{I1} := Z \cdot U \cdot S \cdot CR \cdot W = 627.149 \text{ tonnef} \quad \text{Fza cortante segun E.030}$$

$$CR := \text{if} \left(\frac{C}{R} \geq 0.11, \frac{C}{R}, 0.11 \right) = 0.11$$

$$V_{I2} := Z \cdot U \cdot S \cdot CR \cdot W = 285.615 \text{ tonnef} \quad \text{Fza cortante segun E.030}$$

$$V_{I3} := 1.5 \cdot N \cdot Q_f = 483.02 \text{ tonnef} \quad \text{Fza requerida para activar el SA}$$

$$V_s := \max(V_s, V_{I1}, V_{I2}, V_{I3}) = 656.038 \text{ tonnef} \quad \text{Fza cortante a usar}$$